



TESIS DE DOCTORADO

VISIÓN PROSPECTIVA DE LA SEGURIDAD NATURAL EN UN SISTEMA GLOBAL SOSTENIBLE

Andrés M. Lema Martínez

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL
PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

SANTIAGO DE COMPOSTELA

2020



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR / TUTOR DE LA TESIS

Visión prospectiva de la seguridad saturnal en un sistema global sostenible

Profa. Dra. Dña. Pastora María Bello Bugallo y Prof. Dr. D. José Julio Fernández Rodríguez
de la Universidad de Santiago de Compostela,

INFORMAN:

Que el presente documento de tesis se corresponde con el trabajo realizado por D. Andrés Manuel Lema Martínez durante su etapa de doctorado, bajo nuestra dirección/tutorización y autorizamos su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como directores/tutores de ésta no incurre en las causas de abstención establecidas en Ley 40/2015.

En Santiago de Compostela, 1 de mayo de 2020

Fdo.: Pastora María Bello Bugallo

Fdo.: José Julio Fernández Rodríguez



DECLARACIÓN DEL AUTOR DE LA TESIS

Visión prospectiva de la seguridad natural en un sistema global sostenible

D. Andrés Manuel Lema Martínez.

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

- 1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
- 2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
- 3) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide con la enviada en formato electrónico.
- 4) Confirmo que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mi para la obtención de otros títulos.

Y me comprometo a presentar el ejemplar impreso de la tesis en el plazo de un mes desde que la EDIUS me lo requiera.

En Santiago de Compostela, 1 de mayo de 2020

Fdo. Andrés M. Lema Martínez



TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS.....	X
INDICE DE ACRÓNIMOS.....	XIII
RESUMEN EJECUTIVO.....	XVII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO.....	1
1.2. METODOLOGÍA.....	1
1.3. UNA VISIÓN GENERAL DE LA SEGURIDAD.....	2
1.3.1. LA VISIÓN DE LA SEGURIDAD DE ESPAÑA, ESTADOS UNIDOS Y LA UNIÓN EUROPEA 2	
1.3.2. LAS PARTICULARIDADES DE LA SEGURIDAD NATURAL.....	4
1.4. ASPECTOS GEOPOLÍTICOS Y GEOESTRATÉGICOS DE LA SEGURIDAD NATURAL....	6
1.4.1. EL CAMBIO CLIMÁTICO	6
1.4.2. LOS RECURSOS COMO FUENTE DE CONFLICTOS.....	10
1.5. LA HIPERGLOBALIZACIÓN COMO MARCO DE ACTUACIÓN SOBRE LA SEGURIDAD NATURAL.....	12
1.6. SEGURIDAD NATURAL Y SOSTENIBILIDAD.....	18
1.7. LA GRAN ESPERANZA A LARGO PLAZO: LA FUSIÓN NUCLEAR.....	19
2. SEGURIDAD NATURAL, SEGURIDAD ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD	22
2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. DEFINICIONES Y CONCEPTO.....	23
2.2.1. LA SEGURIDAD NATURAL.....	23
2.2.2. EL CAPITAL NATURAL.....	26
2.2.3. LA SEGURIDAD ENERGÉTICA	27
2.3. LAS VISIONES DE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA Y LA SOSTENIBILIDAD.....	28
2.3.1. LA VISIÓN DE LA COMUNIDAD INTERNACIONAL	28
2.3.2. LA VISIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA	30
2.3.3. LA VISIÓN DE ESPAÑA.....	39
2.4. LA DEPENDENCIA ENERGÉTICA	42
2.5. EQUIDAD ENERGÉTICA.....	47
2.6. LA SEGURIDAD DE LAS INFRAESTRUCTURAS	48
2.7. MÉTRICAS DE LA SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD	51
2.7.1. <i>ENERGY TRILEMMA INDEX</i>	51
2.7.2. <i>ENERGY ARCHITECTURE PERFORMANCE INDEX (EAPI)</i>	55
2.7.3. <i>INTERNATIONAL INDEX OF ENERGY SECURITY RISK</i>	56
2.8. LAS INTERDEPENDENCIAS ENTRE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA, LA SEGURIDAD NATURAL Y LA SOSTENIBILIDAD	58
3. LA DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD	63

3.1.	INTRODUCCIÓN	63
3.2.	LA ACTIVIDAD DE DISTRIBUCIÓN.....	64
3.3.	EL SISTEMA ELÉCTRICO	69
3.3.1.	EVOLUCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO	69
3.3.2.	NECESIDAD DE DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN	71
3.3.3.	ELEMENTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	75
3.3.3.1.	Líneas aéreas.....	78
3.3.3.2.	Líneas subterráneas	84
3.3.3.3.	Centros de transformación, distribución y seccionamiento.....	87
3.3.4.	LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO.....	95
3.3.4.1.	Continuidad del suministro.....	95
3.3.4.2.	Calidad de atención al consumidor	95
3.3.4.3.	La calidad del producto	96
3.3.5.	EL ACCESO DE TERCEROS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN	96
3.3.5.1.	Conexión de consumidores.....	96
3.3.5.2.	Conexión de productores.....	98
3.4.	LA SEGURIDAD NATURAL Y LA SEGURIDAD ENERGÉTICA EN LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	99
3.4.1.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS INSTALACIONES	99
3.4.2.	EL MANTENIMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	102
3.4.2.1.	Consideraciones generales sobre el mantenimiento de las redes de distribución	102
3.4.2.2.	La gestión de la biomasa en las redes de distribución de electricidad	103
3.4.3.	LAS MÉTRICAS DE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA EN EL ÁMBITO DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	113
3.4.4.	NUEVAS SITUACIONES EN LA DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD	118
3.4.4.1.	La digitalización de la red de distribución	118
3.4.4.2.	La descentralización de la producción	119
3.4.4.3.	La integración de las energías renovables y su relación con la seguridad energética	122
3.4.5.	EL USO DEL SF ₆ EN EL TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD ...	128
3.4.5.1.	Generalidades sobre el SF ₆	128
3.4.5.2.	Impacto ambiental y normativa	129
3.4.5.1.	Manipulación del SF ₆ en los equipos de transporte y distribución eléctrica	132
3.4.5.2.	Manipulación del SF ₆ en los equipos de transporte y distribución eléctrica	133
3.4.5.3.	Eliminación de los equipos que han contenido SF ₆ al final de su vida útil	134
3.4.5.4.	Las alternativas al SF ₆	134
3.4.6.	LA PROTECCIÓN DE LA AVIFAUNA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD	141
3.4.6.1.	Desarrollo normativo.....	142
3.4.6.2.	Medidas de protección de la avifauna	143
3.5.	DISCUSIÓN	144
3.6.	CONCLUSIONES	145
4.	RECURSOS ENERGÉTICOS Y MINERALES MARINOS	146
4.1.	INTRODUCCIÓN	146

4.2.	INCREMENTO DE LA DEMANDA DE RECURSOS	148
4.2.1.	SECTORES ESTRATÉGICOS PARA LA SEGURIDAD NACIONAL	148
4.2.2.	INCREMENTO DE LA ACTIVIDAD ECONÓMICA	149
4.2.3.	NUEVAS TECNOLOGÍAS	150
4.2.4.	DEMANDA DE RECURSOS ENERGÉTICOS	151
4.2.5.	DEMANDA DE RECURSOS MINERALES	153
4.3.	RECURSOS MARINOS.....	156
4.3.1.	RECURSOS MARINOS CONVENCIONALES: PETRÓLEO Y GAS NATURAL	156
4.3.2.	RESERVAS DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL.....	161
4.3.3.	DEMANDA Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL	165
4.3.4.	LA ACTIVIDAD <i>OFFSHORE</i> CONVENCIONAL.....	168
4.3.4.1.	Exploración de petróleo y gas natural	173
4.3.4.1.	Producción de petróleo y gas natural	179
4.3.4.2.	Impactos ambientales de la exploración, extracción y transporte del petróleo y del gas natural	183
4.3.5.	RECURSOS MINERALES MARINOS.....	189
4.3.5.1.	Nódulos polimetálicos.....	189
4.3.5.2.	Sulfuros polimetálicos.....	191
4.3.5.3.	Cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto.....	192
4.3.5.4.	Distribución de los recursos minerales marinos	193
4.3.6.	NUEVOS RECURSOS ENERGÉTICOS MARINOS	193
4.3.6.1.	La producción eléctrica eólica <i>offshore</i>	193
4.3.6.2.	Los hidratos de gas.....	201
4.3.7.	IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS MARINOS.....	203
4.3.8.	IMPACTOS DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS MARINOS SOBRE OTRAS ACTIVIDADES	203
4.4.	DISCUSIÓN	209
4.5.	CONCLUSIONES	210
5.	CAPTURA Y UTILIZACIÓN DE CO₂.....	221
5.1.	INTRODUCCIÓN	221
5.2.	LA CAPTURA Y UTILIZACIÓN DEL CO ₂	223
5.2.1.	POLÍTICAS Y MARCO LEGAL DE LA CAPTURA Y UTILIZACIÓN DE CO ₂	225
5.2.2.	TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO ₂	228
5.2.2.1.	Captura post-conversión.....	229
5.2.2.1.	Captura pre-conversión	232
5.2.2.2.	Oxicombustión.....	233
5.2.2.3.	Captura de CO ₂ directamente del aire (<i>Direct Air Capture – DAC</i>) 234	
5.2.2.1.	Bioenergía con captura y almacenamiento de CO ₂ (<i>Bioenergy and Carbon Capture and Storage – BECCS</i>)	235
5.2.3.	UTILIZACIÓN DEL CO ₂	238
5.2.3.1.	Producción de urea a partir de CO ₂	240
5.2.3.2.	Uso del CO ₂ para técnicas mejoradas de extracción de hidrocarburos (<i>Enhanced Oil Recovery</i>) (CO ₂ -EOR)	243
5.2.3.3.	Uso del CO ₂ para la producción de combustibles sintéticos: <i>Power- to-liquid (PtL) / Power-to-Fuel / E-Fuels / Blue Crude</i>	249
5.2.3.4.	Uso del CO ₂ para la obtención de polímeros.....	256
5.2.3.5.	Mineralización - Carbonatación mineral	258

5.3.	DISCUSIÓN	263
5.4.	CONCLUSIONES	264
6.	CONCLUSIONES.....	266
	REFERENCIAS.....	I
	DIFUSIÓN DE RESULTADOS	XXIX



INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PRINCIPALES EMISORES DE CO ₂	9
FIGURA 2: MEDIDA DE LA AMBICIÓN DE LOS NDC DE LOS PAÍSES DEL G20 CON RELACIÓN AL OBJETIVO DE 1,5°C	10
FIGURA 3: DISPUTAS EN EL MAR DEL SUR DE CHINA	12
FIGURA 4: CRECIMIENTO ECONÓMICO MUNDIAL (HISTÓRICO)	14
FIGURA 5: EL SISTEMA DE LAS NACIONES UNIDAS	15
FIGURA 6: ESTADO DE LOS TRATADOS DE LIBRE COMERCIO DE LA UE	16
FIGURA 7: DESPLAZADOS POR CATÁSTROFES NATURALES	24
FIGURA 8: DIFERENTES ESCENARIOS DE EMISIONES DE CO ₂ Y ESCENARIO DE LA HOJA DE RUTA PROPUESTA POR LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)	29
FIGURA 9: CAMBIOS OBSERVADOS EN LA TEMPERATURA Y PREVISIONES PARA DIFERENTES ESCENARIOS ..	31
FIGURA 10: CORREDOR MERIDIONAL DEL GAS	32
FIGURA 11: ESTRATEGIA DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DE LA UNIÓN EUROPEA 2014	35
FIGURA 12: INTEGRACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SEGURIDAD CON LOS MARCOS CLIMÁTICO, ENERGÉTICO E INDUSTRIAL	36
FIGURA 13: MODELO DE ENERGÍA Y CLIMA DE LA UNIÓN EUROPEA	37
FIGURA 14: PROYECTOS DE INTERÉS COMÚN DE LA UNIÓN EUROPEA.....	38
FIGURA 15: INVERSIONES PREVISTAS EN EL BORRADOR DEL PLAN NACIONAL DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030 (PNIEC), EN MILLONES DE EUROS	40
FIGURA 16: LA SEGURIDAD ENERGÉTICA, AMBIENTAL Y LA SOSTENIBILIDAD EN LA ESTRATEGIA DE SEGURIDAD NACIONAL	41
FIGURA 17: DEPENDENCIA ENERGÉTICA ESPAÑA VS OTROS	42
FIGURA 18: PORCENTAJE ENERGÍA RENOVABLE – COMBINADO TRANSPORTE, ELECTRICIDAD, CALEFACCIÓN	43
FIGURA 19: ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA EN ESPAÑA (2018)	44
FIGURA 20: PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR TIPO EN ESPAÑA (KTOE)	45
FIGURA 21: PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR TIPO - CRECIMIENTO ANUAL - ESPAÑA VS EU-28 ..	46
FIGURA 22: IMPORTACIONES DE GAS NATURAL ESPAÑA (2017) EN GWh.....	47
FIGURA 23: NIVEL DE ALERTA EN INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS (25/11/2019)	50
FIGURA 24: NIVEL DE ALERTA ANTITERRORISTA (25/11/2019)	50
FIGURA 25: EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL TRILEMA PARA ESPAÑA	52
FIGURA 26: ÍNDICE MUNDIAL DEL TRILEMA ENERGÉTICO Y SU DESGLOSE	54
FIGURA 27: ELEMENTOS DE SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR ENERGÉTICO	61
FIGURA 28: EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	70
FIGURA 29: VARIACIÓN ANUAL DE LA DEMANDA ELÉCTRICA VS PIB ANUAL	71
FIGURA 30: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA ELÉCTRICO	73
FIGURA 31: FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	74
FIGURA 32: DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA DE TRANSFORMADOR	74
FIGURA 33: DIAGRAMA FUNCIONAL Y ENERGÉTICO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	77
FIGURA 34: APOYO DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN	80
FIGURA 35: APOYOS DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN EN DIFERENTES DISPOSICIONES	81
FIGURA 36: APOYOS DE DIFERENTES TIPOS	83
FIGURA 37: CENTRO DE TRANSFORMACIÓN DE CASETA	87
FIGURA 38: APARAMENTA MODULAR CON CORTE EN SF ₆	90
FIGURA 39: TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA DE ACEITE	91
FIGURA 40: TRANSFORMADORES DE LLENADO INTEGRAL – EQUIPAMIENTO	92
FIGURA 41: TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA DE AISLAMIENTO SECO	93
FIGURA 42: CUADRO DE BAJA TENSIÓN	94
FIGURA 43: CENTRO DE TRANSFORMACIÓN DE INTEMPERIE Y DE PIE DE APOYO	94
FIGURA 44: ZONAS DE ALTO RIESGO DE INCENDIO	105

FIGURA 45: LOCALIZACIONES DE INCENDIOS CAUSADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS EN LA ZONA DE PG&E	108
FIGURA 46: CAUSALIDAD INCENDIOS FORESTALES ESPAÑA 2006-2015	110
FIGURA 47: DAÑOS CAUSADOS POR CAÍDA DE ARBOLADO SOBRE LÍNEAS ELÉCTRICAS	111
FIGURA 48: SUPERFICIE FORESTAL EN GALICIA - % SOBRE EL TOTAL DE LA COMARCA 2018	111
FIGURA 49: VEGETACIÓN - DISTRIBUCIÓN DE USOS DEL SUELO EN GALICIA	112
FIGURA 50: FORMACIONES FORESTALES DOMINANTES	112
FIGURA 51: LÍNEA ELÉCTRICA ATRAVESANDO UNA SUPERFICIE FORESTAL CON LA BIOMASA ACABADA DE GESTIONAR Y ESTADO TRANSCURRIDOS 3,5 AÑOS	113
FIGURA 52: COMPOSICIÓN DEL TIEPI	114
FIGURA 53: TIEPI NACIONAL Y GALICIA (HORAS).....	115
FIGURA 54: NIEPI NACIONAL Y GALICIA	116
FIGURA 55: TIEPI NACIONAL TOTAL Y DESAGREGADO POR COMPONENTES (HORAS)	117
FIGURA 56: REDUCCIÓN DE COSTES EN TECNOLOGÍAS CLAVE PARA EL DESPLIEGUE DE LA PRODUCCIÓN DISTRIBUIDA	121
FIGURA 57: MODALIDADES DE AUTOCONSUMO	122
FIGURA 58: POTENCIA INSTALADA Y PRODUCIDA POR FUENTES Y RELACIÓN PRODUCCIÓN/POTENCIA INSTALADA	123
FIGURA 59: DISTRIBUCIÓN A LO LARGO DEL AÑO DE LA PRODUCCIÓN EÓLICA, HIDRÁULICA Y SOLAR FOTOVOLTAICA	124
FIGURA 60: INTEGRACIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS Y FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA	126
FIGURA 61: CIBERSEGURIDAD ASOCIADA AL DESPLIEGUE DE LA PRODUCCIÓN DISTRIBUIDA	127
FIGURA 62: PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN DEL SF ₆ POR LA ACCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO	129
FIGURA 63: EVOLUCIÓN DE LA CANTIDAD DE SF ₆ EXISTENTE EN EQUIPOS EN FUNCIONAMIENTO.....	131
FIGURA 64: EMISIONES NETAS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ESPAÑA (2018). KT EQ CO ₂ Y %	133
FIGURA 65: PROTOCOLO DE ELIMINACIÓN DE LOS EQUIPOS QUE HAN CONTENIDO SF ₆ AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE	136
FIGURA 66: NIDIFICACIÓN SOBRE APOYOS DE BAJA Y ALTA TENSIÓN	141
FIGURA 67: ZONAS DE PROTECCIÓN DE AVIFAUNA EN LAS QUE ES DE APLICACIÓN LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN EN LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN	142
FIGURA 68: MEDIDAS DE ADAPTACIÓN A LA NORMATIVA DE AVIFAUNA EN INSTALACIONES EXISTENTES	143
FIGURA 69: PRODUCCIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE MUNDIAL BRUTA (2016).....	147
FIGURA 70: EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE MUNDIAL BRUTA Y DETALLE PRODUCCIÓN MARINA, EXCLUYENDO EÓLICA <i>OFFSHORE</i> (2016)	147
FIGURA 71: AUMENTO EN LA DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA 2040	152
FIGURA 72: AUMENTO EN LA DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA (2017-2040) - CAMBIOS POR ORIGEN Y UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA	152
FIGURA 73: AUMENTO EN LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD 2016/2040	153
FIGURA 74: LISTA DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS (CRM) DE LA COMISIÓN EUROPEA (2017)	154
FIGURA 75: NIVEL DE CRITICIDAD DE MATERIAS PRIMAS	154
FIGURA 76: PAÍSES CON MAYORES RECURSOS DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS	155
FIGURA 77: MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS US DEPARTMENT OF ENERGY (2011)	155
FIGURA 78: CRITICIDAD MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS <i>US DEPARTMENT OF ENERGY</i>	156
FIGURA 79: TEORÍA BIOGÉNICA DE LA FORMACIÓN DEL PETRÓLEO Y DEL GAS	157
FIGURA 80: MIGRACIÓN DEL CRUDO Y ALMACENAMIENTO EN LAS TRAMPAS	158
FIGURA 81: TIPOS DE TRAMPAS	158
FIGURA 82: EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE PETRÓLEO (MILES DE MILLONES DE BARRILES) E	161
FIGURA 83: RESERVAS PROBADAS DE PETRÓLEO POR PAÍSES (MILES DE MILLONES DE BARRILES, 2018) .	162
FIGURA 84: RESERVAS PROBADAS DE PETRÓLEO POR PAÍSES (PORCENTAJE, 2018)	162
FIGURA 85: EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE GAS NATURAL (BILLONES DE METROS CÚBICOS)	163
FIGURA 86: RESERVAS PROBADAS DE GAS NATURAL POR PAÍSES (BILLONES DE METROS CÚBICOS, 2018)	163
FIGURA 87: RESERVAS PROBADAS DE GAS NATURAL POR PAÍSES (PORCENTAJE PAÍSES, 2018).....	164
FIGURA 88: PRODUCCIÓN MUNDIAL Y DE ESTADOS UNIDOS DE PETRÓLEO (MILES DE BARRILES DIARIOS, 2018) CON EL <i>PEAK OIL</i> DE HUBBERT SEÑALADO EN ROJO	165
FIGURA 89: CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE PETRÓLEO (MILLONES DE BARRILES DE PETRÓLEO POR DÍA Y MILES DE MILLONES (BILLIONS) DE METROS CÚBICOS DE GAS).....	167

FIGURA 90: PRODUCCIÓN MUNDIAL VS CONSUMO MUNDIAL DE PETRÓLEO (MILLONES DE TONELADAS) (2018)	168
FIGURA 91: ZONAS DE PROSPECCIÓN EN CANARIAS	169
FIGURA 92: MAPA DE POSICIÓN DE PERMISOS DE INVESTIGACIÓN Y CONCESIONES DE EXPLOTACIÓN Y ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO (2017)	170
FIGURA 93: MAPA DE POSICIÓN DE PERMISOS DE INVESTIGACIÓN Y CONCESIONES DE EXPLOTACIÓN Y ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO - DETALLES (2017)	171
FIGURA 94: NOTICIA DE PRENSA SOBRE EL INICIO DE PROSPECCIÓN	172
FIGURA 95: SONDEOS PONTEVEDRA MARINO B-1 Y VIGO A-1	173
FIGURA 96: IMAGEN OBTENIDA DE LA EXPLORACIÓN SÍSMICA	174
FIGURA 97: ESQUEMA DE UNA PERFORACIÓN	179
FIGURA 98: NÚMERO DE MEDIO ANUAL DE VERTIDOS DE PETROLEROS POR DÉCADA	187
FIGURA 99: ACCIDENTE <i>PRESTIGE</i> (2002) - IMÁGENES DE SATÉLITE	188
FIGURA 100: DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES MARINOS	193
FIGURA 101: CAPACIDAD DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS, INCLUIDAS LA <i>OFFSHORE</i> , EN EUROPA (2019)	194
FIGURA 102: INCREMENTOS ANUALES DE CAPACIDAD EÓLICA <i>OFFSHORE</i>	194
FIGURA 103: TRASLADO DE LA PLATAFORMA Y AEROGENERADOR CORRESPONDIENTES A LA PRIMERA UNIDAD DEL PROYECTO <i>WINDFLOAT</i>	196
FIGURA 104: DENSIDAD MEDIA DE POTENCIA (W/m^2)	197
FIGURA 105: PROFUNDAD DEL MAR EN LAS COSTAS EUROPEAS	198
FIGURA 106: ZONIFICACIÓN EÓLICA <i>OFFSHORE</i> ESPAÑA	199
FIGURA 107: CAPACIDAD EÓLICA <i>OFFSHORE</i> INSTALADA HISTÓRICA (HASTA 2017) Y PROYECTADA (ESTIMACIÓN 2018)	200
FIGURA 108: CAPACIDAD EÓLICA <i>OFFSHORE</i> INSTALADA HISTÓRICA (HASTA 2017) Y PROYECTADA (ESTIMACIÓN 2019)	200
FIGURA 109: PREVISIÓN DE CAPACIDAD INSTALADA <i>OFFSHORE</i> POR REGIONES MUNDIALES	200
FIGURA 110: HIDRATOS DE GAS Y LOCALIZACIÓN	202
FIGURA 111: IMPACTOS DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS MARINOS SOBRE OTRAS ACTIVIDADES	205
FIGURA 112: DELIMITACIÓN DE AGUAS TERRITORIAS, ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA Y AGUAS INTERNACIONALES	205
FIGURA 113: VISIÓN GENERAL DE LOS ESPACIOS MARÍTIMOS ESPAÑOLES	208
FIGURA 114: ILUSTRACIÓN SIMPLIFICADA DEL CICLO GLOBAL DEL CARBONO	221
FIGURA 115: EMISIONES DE CO ₂ 1965-2018. TOTAL MUNDIAL, POR REGIONES, ESPAÑA Y % ESPAÑA VS UE	223
FIGURA 116: GRADOS DE MITIGACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL CO ₂	224
FIGURA 117: PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE MITIGACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA CCU	225
FIGURA 118: INVERSIONES PREVISTAS EN EL BORRADOR DEL PLAN NACIONAL DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030 (PNIEC), EN MILLONES DE EUROS	228
FIGURA 119: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE ALGUNAS TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO ₂	229
FIGURA 120: ENERGÍA ASOCIADA A DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL PROCESO DE CAPTURA POR ABSORCIÓN	230
FIGURA 121: COSTES ESTIMADOS Y POTENCIAL DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO A 2050 DEL CO ₂ ATMOSFÉRICO	234
FIGURA 122: PROCESO DE CAPTURA DE CO ₂ ATMOSFÉRICO DE <i>CARBON ENGINEERING</i>	236
FIGURA 123: PROCESOS BECCS	237
FIGURA 124: USOS DEL CO ₂ CONSIDERADOS EN ESTE TEXTO	239
FIGURA 125: SISTEMA DE EVALUACIÓN DE PROCESOS CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD	241
FIGURA 126: EMISIONES DE CO ₂ EN ESPAÑA DEBIDAS A LA FERTILIZACIÓN CON ÚREA	242
FIGURA 127: PRODUCCIÓN TERCIARIA UTILIZANDO CO ₂	244
FIGURA 128: PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO MEDIANTE EOR: PORCENTAJE POR TECNOLOGÍAS	246
FIGURA 129: PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO MEDIANTE EOR: PRODUCCIÓN POR PAÍS 2017 (BARRILES/DÍA)	246
FIGURA 130: INVERSIONES, COSTES E INGRESOS DE LOS DIFERENTES PROCESOS RESPECTO A OTROS	247
FIGURA 131: EMISIONES DEBIDAS AL TRANSPORTE	250
FIGURA 132: PLANTA <i>GEORGE OLAH</i> CO ₂ A METANOL EN SVARTSENGI, ISLANDIA	251
FIGURA 133: REACCIONES PRINCIPALES DE LA SÍNTESIS DE FISCHER-TROPSCH	253
FIGURA 134: USO DEL METANOL COMO COMBUSTIBLE (EN MILES DE TONELADAS Y PORCENTAJE DE METANOL PRODUCIDO USADO COMO COMBUSTIBLE)	254

FIGURA 135: PROCESOS <i>POWER-TO-LIQUIDS</i> (PtL) Y <i>POWER-TO-GAS</i> (PtG)	255
FIGURA 136: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ETILENO Y PROYECCIONES A PARTIR DE 2016.....	256
FIGURA 137: USOS Y FUENTES DEL ETILENO	256
FIGURA 138: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PROPILENO Y FUENTES	257
FIGURA 139: pH TRAS 28 DÍAS DE MADURACIÓN DEL HORMIGÓN SIN CO ₂ (AZUL) Y CON DIFERENTES APORTACIONES DE CO ₂	259
FIGURA 140: PROCESO DE CARBONATACIÓN MINERAL <i>EX SITU</i>	262





INDICE DE TABLAS

TABLA 1: SECTORES/REGIONES CON MAYORES COSTES SOBRE EL CAPITAL NATURAL	26
TABLA 2: CIFRAS RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD ENERGÉTICA EN LA UE	32
TABLA 3: OBJETIVOS DE LA UNIÓN EUROPEA PARA 2030.....	37
TABLA 4: OBJETIVOS DEL ANTEPROYECTO DE LEY DE CAMBIO CLIMÁTICO	39
TABLA 5: OBJETIVOS DEL BORRADOR DEL PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA (PNIEC) ..	39
TABLA 6: INCREMENTOS EN LA POTENCIA INSTALADA EÓLICA Y SOLAR FOTOVOLTAICA PREVISTOS EN EL PNIEC	39
TABLA 7: ÍNDICE DEL TRILEMA ENERGÉTICO DE LOS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA	53
TABLA 8: ÍNDICE DEL TRILEMA ENERGÉTICO DE OTROS PAÍSES	53
TABLA 9: INDICADORES CORRESPONDIENTES A LA SEGURIDAD ENERGÉTICA EN EL EAPI	55
TABLA 10: <i>ENERGY ARCHITECTURE PERFORMANCE INDEX</i> (2017)	55
TABLA 11: INTERNATIONAL INDEX OF ENERGY SECURITY RISK (2018)	56
TABLA 12: MÉTRICAS QUE FORMAN EL ÍNDICE Y POSICIÓN DE ESPAÑA EN CADA UNO DE ELLOS	57
TABLA 13: NORMATIVA REGULATORIA DE LA ACTIVIDAD DE DISTRIBUCIÓN	65
TABLA 14: DISTRIBUCIÓN POR PROVINCIAS DE EMPRESAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	65
TABLA 15: EMPRESAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN GALICIA	66
TABLA 16: CUOTA DE DISTRIBUCIÓN EN GALICIA	67
TABLA 17: EVOLUCIÓN NORMATIVA DE LA RETRIBUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE DISTRIBUCIÓN	67
TABLA 18: INCREMENTO DE LA DEMANDA DURANTE LA GENERALIZACIÓN DEL USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	70
TABLA 19: INCREMENTO ANUAL DE LA DEMANDA	70
TABLA 20: VALORES USUALES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO	73
TABLA 21: TENSIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DE TRANSFORMADORES	75
TABLA 22: COMPARACIÓN ENTRE LÍNEAS AÉREAS Y SUBTERRÁNEAS	86
TABLA 23: COMPORTAMIENTOS DE LOS ELEMENTOS DE MANIOBRA EN CORTOCIRCUITOS	88
TABLA 24: PLAZOS PARA LA CONTESTACIÓN DE SOLICITUDES DE SUMINISTRO	95
TABLA 25: PLAZOS PARA LA CONTESTACIÓN DE SOLICITUDES DE SUMINISTRO	95
TABLA 26: OTROS PLAZOS RELACIONADOS CON LOS SUMINISTROS	96
TABLA 27: ENTIDAD QUE COSTEA LAS INFRAESTRUCTURAS ASOCIADAS A LAS SOLICITUDES DE SUMINISTRO	97
TABLA 28: PUNTOS DE CONEXIÓN PARA SUMINISTROS O PRODUCTORES	97
TABLA 29: NORMATIVA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN	99
TABLA 30: ENLACES A NORMATIVAS PARTICULARES DE LAS PRINCIPALES DISTRIBUIDORAS ELÉCTRICAS	101
TABLA 31: NORMATIVA APLICABLE A LA INSPECCIÓN/VERIFICACIÓN Y CORRECCIÓN REGLAMENTARIA	102
TABLA 32: DISTANCIA A MASAS DE ARBOLADO SEGÚN EL REGLAMENTO DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	106
TABLA 33: CAUSALIDAD INCENDIOS FORESTALES ESPAÑA (DECENIO 2006-2015)	109
TABLA 34: RENDIMIENTO FORESTAL DE DIFERENTES TIPOS DE ARBOLADO.....	113
TABLA 35: CLASIFICACIÓN DE ZONAS PARA CALIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	113
TABLA 36: LÍMITE DE TIEPI EN FUNCIÓN DE LAS ZONAS	114
TABLA 37: NORMATIVA SUSTITUCIÓN DE EQUIPOS DE CONTADORES	119
TABLA 38: LÍMITES DE EMISIONES EN LAS DIFERENTES FASES DEL CICLO DE VIDA DE LOS EQUIPOS	132
TABLA 39: CARACTERÍSTICAS DEL GAS HFO1234zeE Y COMPARACIÓN CON EL SF ₆	135
TABLA 40: ALTERNATIVAS SF ₆	137
TABLA 41: MEDIDAS DE ADAPTACIÓN A LA NORMATIVA DE AVIFAUNA EN INSTALACIONES EXISTENTES	143
TABLA 42: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GAS NATURAL	159
TABLA 43: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CRUDO	159
TABLA 44: MEDIA Y RANGO DE LA FRACCIÓN DE MASA DE HIDROCARBUROS EN EL CRUDO	159
TABLA 45: VALORES DE GRAVEDAD API PARA DIFERENTES CRUDOS	160
TABLA 46: DESCUBRIMIENTOS COMERCIALES <i>OFFSHORE</i> ESPAÑA	168
TABLA 47: IMPACTOS SOBRE LOS CETÁCEOS DE LOS PROCESOS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA.....	184
TABLA 48: MÉTODOS DE DETECCIÓN DE MAMÍFEROS MARINOS EN TRABAJOS DE ADQUISICIÓN SÍSMICA ..	184

TABLA 49: ACCIONES SOBRE EL MEDIO AMBIENTE Y SUS FUENTES DE LAS OPERACIONES DE PERFORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL YACIMIENTO <i>OFFSHORE</i>	186
TABLA 50: EFECTOS SOBRE LAS AVES DE LAS INSTALACIONES <i>OFFSHORE</i>	189
TABLA 51: CONTRATOS DE EXPLORACIÓN PARA NÓDULOS POLIMETÁLICOS.	190
TABLA 52: CONTRATOS DE EXPLORACIÓN PARA SULFUROS POLIMETÁLICOS	191
TABLA 53: CONTRATOS DE EXPLORACIÓN PARA CORTEZAS DE FERROMANGANESO RICAS EN COBALTO ..	192
TABLA 54: IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS MARINOS	204
TABLA 55: EJEMPLOS DE CONTROVERSIAS PLANTEADAS POR DIFERENTES ESTADOS ANTE LAS INSTANCIAS DEFINIDAS POR LA CONVENCIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DERECHO DEL MAR DE 1982	207
TABLA 56: ZONAS EN LITIGIO DE ESPAÑA	208
TABLA 57: ANEXO I: USOS Y APLICACIONES DE LAS MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS	212
TABLA 58: ANEXO II: RESERVAS PROBADAS DE PETRÓLEO - HISTÓRICO (MILES DE MILLONES DE BARRILES)	217
TABLA 59: ANEXO III. RESERVAS PROBADAS DE GAS NATURAL - HISTÓRICO (BILLONES (<i>TRILLIONS</i>) DE METROS CÚBICOS)	218
TABLA 60: ANEXO IV: LISTADO DE PERMISOS Y CONCESIONES EN ESPAÑA	219
TABLA 61: DIFERENTE TERMINOLOGÍA RELACIONADA CON LA CAPTURA Y UTILIZACIÓN DE CO ₂	226
TABLA 62: OBJETIVOS DE LA UNIÓN EUROPEA	226
TABLA 63: OBJETIVOS DEL ANTEPROYECTO DE LEY DE CAMBIO CLIMÁTICO	227
TABLA 64: OBJETIVOS DEL BORRADOR DEL PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA (PNIEC)	227
TABLA 65: DISOLVENTES UTILIZADOS Y ESTUDIADOS PARA PROCESOS DE CAPTURA DE CO ₂ POR ABSORCIÓN QUÍMICA	231
TABLA 66: PROCESOS QUÍMICOS DE CAPTURA DE CO ₂ DEL AIRE POR ABSORCIÓN	235
TABLA 67: CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE EOR Y ALMACENAMIENTO	245
TABLA 68: BALANCE NETO DE LAS EMISIONES DE CO ₂ DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE EOR Y ALMACENAMIENTO	247
TABLA 69: SUSTANCIAS OBTENIDAS A PARTIR DE HIDROGENACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO (INFORME DE SINGAPUR)	250
TABLA 70: COMPARACIÓN DE LAS REACCIONES EN LOS PROCESOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE CARBONATACIÓN.	261
TABLA 71: COMPOSICIÓN DE LOS SILICATOS Y RATIO DE KG DE MINERAL NECESARIO POR KG DE CO ₂ CAPTURADO (CONDICIONES ÓPTIMAS DE CARBONATACIÓN).....	261



INDICE DE ACRÓNIMOS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASIDI	<i>Average System Interruption Duration Index</i>
ASIFI	<i>Average System Interruption Frequency Index</i>
BECCS	<i>Bioenergy and Carbon Capture and Storage</i> - Bioenergía con captura y almacenamiento de CO ₂
BOP	<i>Blowout Preventer</i> – Preventor
BP	<i>British Petroleum</i>
CAIDI	<i>Customer Average Interruption Duration System</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> – Captura y almacenamiento del CO ₂
CCU	<i>Carbon Capture and Utilization</i> – Captura y utilización de dióxido de carbono.
CFC	Clorofluorocarbonos
CIREN	<i>International Conference on Electricity Distribution</i>
CNPIC	Centro Nacional de Protección de Infraestructuras y Ciberseguridad
CSDP	<i>Common Security and Defence Policy</i> – Política Común de Seguridad y Defensa
CO ₂ -EOR	<i>CO₂ Enhanced Oil Recover</i>
COP	Conferencia de las Partes (<i>Conference of the Parties</i>)
CRM	<i>Critical Raw Materials</i>
DER	<i>Distributed Energy Resources</i> – Generación Distribuida
DME	Dimetiléter
EAPI	<i>Energy Architecture Performance Index</i>
ENIENSA	Empresa Nacional de Investigación y Exploración de Petróleo
EOR	<i>Enhanced Oil Recover</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
IDEA	Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agencia Internacional de la Energía
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (<i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)

ISA	<i>International Seabed Authority</i> – Autoridad Internacional de los Fondos Marinos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kV	Kilovoltio
MEA	Monoetanolamina
MTO	<i>Methanol To Olefins</i>
NDC	<i>National Determined Contributions</i> – Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional
NIEPI	Número de Interrupciones Equivalentes a la Potencia Instalada
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos - <i>Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)</i>
ODP	Potencial de Agotamiento del Ozono. <i>Ozone Depletion Potential</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i> - Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE)
ONUDI	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial – <i>United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)</i> .
OPEC	<i>Organization of the Petroleum Exporting Countries</i> – Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP)
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo – <i>Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)</i>
PAII	Parroquias de Alta Actividad Incendiaria
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PG&E	<i>Pacific Gas and Electric</i>
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
REE	Red Eléctrica de España
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency System</i>
SCS	<i>Soil Carbon Secuestation</i> – Almacenamiento de CO ₂ en el suelo
SECORBE	Asociación Nacional de Fabricantes de Bienes de Equipo
SUA	<i>Suppression of Unlawful Acts (Against the Safety of Maritime Navigation)</i>
TIEPI	Tiempo de Interrupción Equivalente a la Potencia Instalada
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (<i>International Union for Conservation of Nature – IUCN</i>)
UNE	Una Norma Española
UNE-EN	Una Norma Española-European Norm
UNESA	Asociación Española de la Industria Eléctrica
WAG	<i>Water Alternating Gas floods</i>
WEF	<i>World Energy Forum</i>

ZAR	Zonas de Alto Riesgo de Incendio
ZEPA	Zona de Especial Protección para las Aves





RESUMEN EJECUTIVO

Entendiendo la seguridad natural como aquellos aspectos de seguridad relacionados con las interacciones entre las infraestructuras energéticas, el uso de la energía y la explotación de recursos minerales y energéticos y el medio ambiente y la sociedad, este trabajo gira fundamentalmente en torno a la seguridad, la energía y los recursos, todo ello en el marco de una sociedad hiperglobalizada y con una visión sostenible. Esta sociedad tiene una estructura extremadamente compleja e interconectada a través de procesos globalizadores que tienen como uno de sus pilares fundamentales las tecnologías de la información y la comunicación que en la actualidad han experimentado un fuerte avance respecto a la situación de hace muy pocos años y que en el futuro inmediato seguirán transformando el mundo con una mucha mayor interconectividad que intensificará todavía más estos procesos globalizadores. La complejidad de la sociedad viene determinada por el gran número de partes implicadas (a nivel de gobernanza en diferentes ámbitos territoriales, a nivel empresarial, financiero, social y sectorial), el elevado nivel tecnológico y los mecanismos regulatorios que permiten el funcionamiento del sistema según las políticas establecidas.

El análisis parte de un primer capítulo introductorio, muy influenciado por el punto de vista de las ciencias sociales, donde se analiza el concepto general de seguridad y su enfoque desde la visión occidental, para posteriormente particularizar el concepto de seguridad natural según el alcance de la definición del término en este trabajo. La visión global y sostenible requiere de la introducción de la dimensión geopolítica y geoestratégica de la seguridad natural (con especial detalle en el cambio climático y en los recursos como origen o catalizadores de conflictos), de los procesos globalizadores que interconectan el planeta y el encaje de los diferentes temas tratados en la tesis en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Un aspecto íntimamente relacionado con la seguridad natural es la seguridad energética de forma que podemos identificar varios elementos de riesgo para la primera. Por un lado, las infraestructuras energéticas y la extracción de los recursos naturales necesarios son elementos que suponen amenazas para el medio ambiente y la sociedad, tanto durante su funcionamiento normal como en situaciones de disfuncionalidad derivadas de incidentes, accidentes o actos intencionados. Por otro lado, los propios fenómenos naturales son fuentes de riesgo para las infraestructuras, de forma que, en caso de materializarse estos riesgos, los daños en las infraestructuras pueden, a su vez, causar efectos perjudiciales para el medio ambiente y para la sociedad. La seguridad energética tiene un papel fundamental en el funcionamiento de una sociedad fuertemente basada en la tecnología, que depende de esta y de la energía para el desempeño de sus funciones, tanto las más básicas como las que caracterizan a una civilización avanzada. Pero además de la puramente funcional, la seguridad energética tiene además una dimensión social que de no gestionarse adecuadamente desencadenará conflictos que amenacen la seguridad.

Aunque los desafíos de la energía en materia de seguridad son múltiples, desde el punto de vista del autor existen tres aspectos que requieren de especial atención. La contaminación atmosférica de los procesos de transformación, producción y utilización de la energía, el cambio climático y los aspectos geoestratégicos de la energía con claras

implicaciones en materia de seguridad. Estos tres aspectos no están ni muchos menos aislados y sus interrelaciones son múltiples. En este sentido, en buena medida, las acciones que es necesario adoptar en materia climática tendrán también efectos beneficiosos sobre la contaminación atmosférica. En cualquier caso, la amplitud del asunto hace necesario que, para conseguir cierto nivel de detalle, sea necesaria la selección de casos de estudio que permitan realizar un análisis profundo.

La lucha contra el cambio climático requiere de procesos energéticos de bajo contenido en carbono. Para ello es fundamental aumentar el nivel de electrificación del uso de la energía y en este sentido las infraestructuras de distribución de electricidad cobran un protagonismo esencial. Aún teniendo en cuenta medidas de eficiencia energética, la capacidad de la red tendrá que adaptarse a las nuevas demandas. Pero la adaptación de la red eléctrica no será solo de capacidad. La transición de un modelo como el actual donde la producción eléctrica tiene un carácter predominantemente centralizado hacia situaciones en el futuro próximo con producciones situadas en todos los puntos de la red también requerirá transformaciones de esta para permitir su gestión de forma segura, incrementando su automatización y digitalización. Esto nos lleva además a otros desafíos relacionados con la seguridad para reducir la vulnerabilidad de las redes.

Los recursos naturales, tanto minerales como energéticos, son otro aspecto importante de la seguridad natural. La disponibilidad de los recursos es fundamental para el desarrollo tecnológico, pero también es una cuestión clave de seguridad en su dimensión geoestratégica. La distribución no uniforme de los recursos crea situaciones de poder, de dependencia y de interdependencia, y los cambios tecnológicos y en los modelos energéticos no eliminan esta situación, sino que pueden tener como efecto cambios en estas relaciones. Lo que está por ver es el alcance de estos reequilibrios. Cambios demasiado bruscos en los modelos pueden ser fuentes de conflictos que pongan en riesgo la seguridad. Será necesario, por lo tanto, establecer elementos amortiguadores de estos cambios. Por un lado, la necesidad tanto de aumentar los recursos disponibles como sobre todo de diversificar su procedencia justifica mirar a los océanos como fuente de estos recursos. Por otro lado, la descarbonización completa del sistema energético es algo que no se prevé a largo plazo. Todos los indicios apuntan a que el uso del petróleo y del gas (incluso en cierta medida del carbón) será importante en las próximas décadas lo que permitirá un proceso de adaptación de los productores hacia otros modelos económicos, lo que sin duda es un elemento amortiguador que evite la posibilidad de conflictos.

Pero la realidad de esta continuidad en el uso del petróleo y el gas en las próximas décadas colisiona con la urgente necesidad de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, y en particular del dióxido de carbono, por lo que la adopción de medidas de mitigación de estas emisiones se hace imprescindible. Una de las medidas de mitigación contempladas prácticamente desde el inicio de las preocupaciones climáticas es la captura, utilización y almacenamiento del CO₂, aunque posteriormente se produjo un enfriamiento de las expectativas de esta tecnología debido a su coste, a sus requerimientos energéticos y a que desde el activismo ambiental se la veía como una herramienta para prolongar en el tiempo el uso de los combustibles fósiles. Sin embargo, el informe de 2018 del IPCC en el que se pone de manifiesto la necesidad de limitar el incremento de temperatura a 1,5°C hace necesaria la intensificación de las medidas de reducción de emisiones y las tecnologías de captura, almacenamiento y utilización del dióxido de carbono vuelven a aparecer como herramientas útiles en este sentido.

ABSTRACT

Understanding natural security as those aspects of security related to the interactions between energy infrastructures, the use of energy and the exploitation of mineral and energy resources and the environment and society, this work fundamentally revolves around security, energy and resources, all within the framework of a hyperglobalized society with a sustainable vision. This society has an extremely complex and interconnected structure through globalizing processes that have as one of its fundamental pillars the information and communication technologies that currently have undergone a strong advance regarding the situation of a few years ago and in the immediate future they will continue to transform the world with a much greater interconnectivity that will further intensify these globalizing processes. The complexity of society is determined by the large number of parties involved (at the level of governance in different territorial areas, at the business, financial, social and sector level), the high technological level and the regulatory mechanisms that allow the system to function according to the established policies.

The analysis starts from a first introductory chapter, very influenced by the point of view of the social sciences, where the general concept of security and its approach from the Western perspective is analyzed, to later particularize the concept of natural security according to the scope of the definition of the term in this work. The global and sustainable vision requires the introduction of the geopolitical and geostrategic dimension of natural security (with special detail on climate change and on resources as origin or conflict catalysts), of the globalizing processes that interconnect the planet and the fit of the different topics covered in the thesis in the Sustainable Development Goals.

An aspect closely related to natural security is energy security so that we can identify several risk elements for the first. On the one hand, energy infrastructure and the extraction of necessary natural resources are elements that pose threats to the environment and society, both during normal operation and in situations of dysfunctionality arising from incidents, accidents or intentional acts. On the other hand, the natural phenomena themselves are sources of infrastructure risk, so that, if these risks materialize, infrastructure damage can, in turn, cause detrimental effects on the environment and society. Energy security plays a fundamental role in the operation of a society strongly based on technology, which depends on it and the energy for the performance of its functions, both the most basic and those that characterize an advanced civilization. But in addition to the purely functional, energy security also has a social dimension that, if not properly managed, will trigger conflicts that threaten security.

Although the energy challenges in security are multiple, from the author's point of view there are three aspects that require special attention. The air pollution of the processes of transformation, production and use of energy, climate change and geostrategic aspects of energy with clear implications for safety. These three aspects are far from isolated and their interrelationships are multiple. In this sense, to a large extent, the actions that need to be taken on climate issues will also have beneficial effects on air pollution. In any case, the breadth of the matter makes it necessary that, in order to achieve a certain level of detail, the selection of case studies that allow a thorough analysis is necessary.

The fight against climate change requires low carbon energy processes. To this end, it is essential to increase the level of electrification of energy use and in this sense the electricity distribution infrastructures take on an essential role. Even taking into account energy efficiency measures, the capacity of the network will have to adapt to the new demands. But the adaptation of the electricity grid will not only be of capacity. The transition from a model like the current one where electricity production has a predominantly centralized character towards situations in the near future with productions located in all points of the network will also require transformations of this to allow its management in a safe way, increasing its automation and digitization. This also leads us to other security-related challenges to reduce network vulnerability.

Natural resources, both mineral and energy, are another important aspect of natural security. The availability of resources is essential for technological development, but it is also a key security issue in its geostrategic dimension. The non-uniform distribution of resources creates situations of power, dependence and interdependence, and technological changes and energy models do not eliminate this situation but can have the effect of changes in these relationships. What remains to be seen is the scope of these rebalances. Too abrupt changes in models can be sources of conflicts that put security at risk. It will be necessary, therefore, to establish damping elements for these changes. On the one hand, the need both to increase available resources and, above all, to diversify their origin justifies looking at the oceans as a source of these resources. On the other hand, the complete decarbonization of the energy system is something that is not expected in the long term. All indications suggest that the use of oil and gas (even to some extent coal) will be important in the coming decades, which will allow a process of adaptation of producers to other economic models, which is undoubtedly a buffer that avoids the possibility of conflicts.

But the reality of this continuity in the use of oil and gas in the coming decades collides with the urgent need for the reduction of greenhouse gas emissions, and in particular of carbon dioxide, so that the adoption of measures mitigation of these emissions is essential. One of the mitigation measures contemplated practically since the beginning of the climatic concerns is the capture, use and storage of CO₂, although later there was a cooling of the expectations of this technology due to its cost, its energy requirements and the fact that the from the point of view of environmental activism this technology was seen as a tool to prolong the use of fossil fuels over time. However, the 2018 IPCC report that highlights the need to limit the temperature increase to 1.5°C makes it necessary to intensify emission reduction measures and technologies for capture, storage and use of dioxide carbon reappear as useful tools in this regard.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es el estudio de los aspectos de seguridad relacionados con las interacciones entre las infraestructuras energéticas, el uso de la energía y la explotación de recursos minerales y energéticos y el medio ambiente y la sociedad. Estos aspectos de seguridad son los que en esta tesis se define de forma genérica como seguridad natural, acotando el concepto más amplio de seguridad medioambiental, y donde cobra también protagonismo la seguridad energética.

El estudio conduce a un análisis prospectivo, que necesariamente debe tener en cuenta la interconectividad de los sistemas presentes en la sociedad mundial hiperglobalizada y que necesita que el necesario desarrollo humano, social, económico y tecnológico tenga lugar de una forma compatible con el mantenimiento de nuestra forma de vida, de las civilizaciones que conforman la sociedad humana del planeta y el respeto a las necesidades de las generaciones futuras. En definitiva, un marco global de sostenibilidad.

Aunque la tecnología y los procesos tienen un papel fundamental en la consecución de un desarrollo sostenible, por sí mismos no pueden alcanzarlo. Al fin y al cabo la ciencia y la tecnología son una parte de la sociedad, pero como parte tiene que interactuar con el resto de ella, por lo que además de los aspectos técnicos objeto de estudio, la tesis se adentra en el campo de las ciencias sociales con el estudio de las relaciones de la seguridad natural con los aspectos generales de seguridad que tanto preocupan a las sociedades actuales dotándola de un carácter de interdisciplinariedad que se entiende necesario para un estudio suficientemente detallado.

1.2. METODOLOGÍA

La diversidad tecnológica de la sociedad actual es amplísima, y más lo va a ser en el futuro cercano. Esto hace que el sistema en estudio sea tan grande que, además de los aspectos generales comunes a todas las tecnologías y procesos, sea necesario seleccionar casos de estudio y aplicar sobre ellos el análisis.

La selección de los casos de estudio se ha realizado por una parte, basándose en la experiencia profesional del autor, de forma que puede aportar al trabajo el conocimiento adquirido durante su trayectoria profesional y por otra parte en función de los temas que hemos visto que han adquirido relevancia durante los trabajos del grupo de investigación Tecnología para la Economía Circular y la Seguridad Natural (TEC-SENA, GI-2160) del que forma parte el autor, así como sus colaboraciones con el Centro de Estudios de Seguridad de la Universidad de Santiago de Compostela (CESEG).

A partir de la selección de los casos de estudio se realiza la investigación del estado del arte de cada uno de ellos para realizar un análisis deductivo y prospectivo con una fuerte base empírica apoyada en las referencias citadas.

1.3. UNA VISIÓN GENERAL DE LA SEGURIDAD

Históricamente para los Estados la seguridad siempre ha sido un asunto prioritario, pero lo que sí ha ido cambiando es el alcance del concepto de seguridad, pasando de un alcance básico correspondiente al aseguramiento de las estructuras del Estado, la integridad territorial y el acceso a los recursos necesarios para su funcionamiento a otro espectro más amplio en el que se añadirían progresivamente aspectos como la seguridad ciudadana, la protección de las actividades económicas, la seguridad alimentaria y la seguridad biológica. En épocas más recientes (unas pocas décadas) se incorporaron conceptos como la seguridad industrial, la seguridad energética, la seguridad marítima, la seguridad en el trabajo, la seguridad medioambiental y como última incorporación hasta el momento la ciberseguridad.

Como afirma José Julio Fernández, no cabe duda de que hemos asistido a una serie de cambios y mutaciones en las sociedades a lo largo de la Historia, pero "nunca antes estas transformaciones habían sido tan intensas y rápidas como hace aproximadamente tres décadas" [1].

El marco de complejidad, interconectabilidad y globalidad que caracteriza a la sociedad actual la hace vulnerable no solo a las amenazas físicas, ya sean agresiones convencionales por parte de otros Estados o dentro del propio Estado, o mediante ataques terroristas, sino que esta vulnerabilidad se ve incrementada por amenazas sobre los sistemas de información y comunicación así como amenazas sobre la estabilidad social y económica que se han visto intensificadas por la globalización y la potencia de los múltiples sistemas de comunicación no convencionales (redes sociales). El conjunto de todas estas amenazas se conoce como amenazas híbridas.

1.3.1. La visión de la seguridad de España, Estados Unidos y la Unión Europea

La categoría de seguridad tiene un sentido polisémico, lo que dificulta claramente su análisis. En todo caso, siguiendo a José Julio Fernández, la transcendencia de esta cuestión es evidente. En efecto, "sin seguridad no habrá democracia, pues el ejercicio de esta y de los derechos que ampara no es efectivo sin un nivel adecuado de seguridad, sea jurídica, ciudadana, nacional, internacional" o natural [1].

Desde el punto de vista de España, la seguridad nacional se entiende como un "servicio público objeto de una acción del Estado dirigida a proteger la libertad, los derechos y bienestar de los ciudadanos, a garantizar la defensa de España y sus principios y valores constitucionales, así como a contribuir junto a sus socios y aliados a la seguridad internacional en cumplimiento de los compromisos acordados" [2]. Esta definición de seguridad nacional refleja la integración de España en un ámbito internacional de protección mutua que contrasta con el concepto de seguridad existente en países que hasta hace poco tiempo se caracterizaban por su vocación de liderar la seguridad mundial, pero que ante las nuevas amenazas, los posicionamientos geoestratégicos y geopolíticos de rivales y enemigos y una mayor tendencia multilateralista de algunos de sus principales aliados, decide replegarse en el reforzamiento de su soberanía. En este sentido, en el caso de Estados Unidos, su estrategia de seguridad tiene como principal fundamento la protección de los ciudadanos, la patria, la forma de vida del país y su prosperidad utilizando la fuerza militar y la influencia del país en el mundo, reforzando la soberanía de la nación y reclamando mayores esfuerzos a los aliados para la protección común [3]. Esta visión cuestiona abiertamente la multilateralidad en el ámbito de la seguridad, critica el enfoque ideológico de posturas anteriores, se enfrenta frontalmente a sus aliados por lo que considera compromisos insuficientes y señala de forma explícita a Estados rivales y enemigos (China, Rusia, Corea del Norte e Irán) y considera necesario para la paz

mantener las ventajas militares, tecnológicas y económicas, que en muchos casos se dan por supuestas, pero que necesitan ser reforzadas. Este repliegue a ámbitos de seguridad internos contrasta con la visión de liderazgo e integración internacional de la estrategia de seguridad de la administración anterior. Este liderazgo se materializaría a través de la fortaleza, el ejemplo de la gobernanza propia, el concurso de sus socios y de todos los instrumentos de su poder y con una perspectiva a largo plazo [4].

En lo que respecta a la Unión Europea su desempeño en materia de seguridad es manifiestamente mejorable, debido fundamentalmente a dos razones: la naturaleza de su Política Común de Seguridad y Defensa (PCSD, *Common Security and Defence Policy – CSDP*) y las diferentes visiones que tienen los Estados Miembros acerca de la forma más adecuada de afrontar la seguridad y defensa común. Y es que el Tratado de la Unión Europea por un lado restringe el alcance de las operaciones militares al mantenimiento de la paz y la prevención de conflictos a actuaciones fuera del territorio de la Unión. Además, estas misiones se deben realizar con aportaciones voluntarias de los Estados Miembros ya que, como es conocido, la Unión Europea no dispone de infraestructura militar propia. Por otro lado, tenemos la división entre los Estados Miembros acerca de la forma más eficaz de proporcionar seguridad a la Unión, ya sea porque políticamente tienen una visión más próxima al liderazgo de los Estados Unidos en la defensa de occidente, incluida la Unión Europea, como es el caso del Reino Unido o porque ven a la OTAN como un instrumento de defensa mucho más eficaz, como sucede con algunos países del este de Europa [5]. Las restricciones en la CSDP hacen que sea imposible ver a la Unión Europea como una potencia militar capaz de proporcionar seguridad a su territorio. Esta visión se ve reforzada con el pobre e incluso contraproducente resultado de la acción exterior europea en diferentes conflictos (por ejemplo, el caso de Siria [5]), así como la respuesta a las presuntas agresiones rusas, tanto en el entorno de la Unión como en acciones en las que ciudadanos de la Unión perdieron la vida. Se puede citar el apoyo de Rusia al separatismo en el este de Ucrania en cuyo marco se puede encuadrar el derribo del vuelo MH17 en el que murieron 298 personas, muchas de ellas ciudadanos de la Unión (sobre todo holandeses) [6], la anexión de Crimea, o los cortes de suministro de gas hacia Ucrania que provocaron enormes problemas de seguridad energética en países de la Unión Europea en 2014. Por no hablar de la presunta implicación de Rusia en la desestabilización de sociedades de los países miembros. Europa se encuentra cómoda en aspectos como la defensa contra el cambio climático y la transición energética, pero no parece encontrar el camino hacia una estructura sólida de seguridad y defensa común. Sin embargo, la actitud de Estados Unidos hacia Europa reclamando el aumento de su gastos en defensa hasta el 2% del PIB, incluso un 4% con el tiempo, la imposición de aranceles a productos europeos y diferentes declaraciones hostiles hacia la Unión Europea por parte del presidente y del vicepresidente, así como las confusas relaciones del presidente Trump y el presidente Putin llevaron en 2018 a la propuesta de Francia conocida como la Iniciativa Europea de Intervención (EI2) (*European Intervention Initiative (EII-EI2)*). El objetivo de la iniciativa es conseguir la máxima integración de las capacidades militares de los países miembros para la defensa de la seguridad europea [7]. Sin embargo, no es una iniciativa encuadrada en la Unión Europea, tal vez por las restricciones ya citadas. En este sentido es relevante la presencia del Reino Unido cuando el referéndum del Brexit ya había tenido lugar dos años antes. En la actualidad ya forman parte de la EI2 países no miembros de la Unión. En total, los países que forman parte son, los inicialmente firmantes Bélgica, Dinamarca, Estonia, Francia, Alemania, Holanda, Portugal, España y el Reino Unido, incorporándose posteriormente Noruega, Suecia y finalmente hasta el momento Italia. La pertenencia a EI2 requiere compatibilidad con los objetivos de la OTAN y de la UE. De hecho, se prevé que las actuaciones de la Iniciativa puedan tener

como marco institucional cualquiera de las dos organizaciones, pero también podrían ser actuaciones propias de la EI2 [7]. En el marco de la Unión Europea, con el fin de avanzar en materia de seguridad y defensa, se constituyó la Cooperación Estructurada Permanente (*Permanent Structured Cooperation - PESCO*) basándose en el artículo 42.6 del Tratado de la Unión [8] en donde se establecía este sistema para los Estados miembros con capacidades militares más elevadas y que hayan suscrito compromisos para las misiones más exigentes, a la que se podían integrar voluntariamente los países miembros (no están integrados Reino Unido, Dinamarca y Malta) para mejorar la coordinación e incrementar las inversiones y la cooperación para el desarrollo de las capacidades de defensa, manteniendo los Estados miembros las capacidades militares desarrolladas en PESCO [9], materializándose hasta la fecha en proyectos liderados por uno de los países de miembros con otros participando en ellos. En la actualidad se desarrollan 47 proyectos, después de la incorporación de 13 nuevos en noviembre de 2019.

Como se ve, existe un cúmulo de cuestiones abiertas y prospectivas en las que hay que avanzar. Indica José Julio Fernández que "desde el fin de la Guerra Fría los retos y amenazas emergentes han ido complicándose sobremanera, hasta alumbrar un contexto internacional que no se vislumbraba en modo alguno" [10].

1.3.2. Las particularidades de la seguridad natural

En el ámbito de esta tesis se define la seguridad natural como el conjunto de los aspectos de seguridad relacionados con las interacciones entre las infraestructuras energéticas, el uso de la energía y la explotación de recursos minerales y energéticos y el medio ambiente y la sociedad. Tenemos, por tanto, una doble visión. Por un lado, los efectos de la producción y utilización de la energía y de la extracción de los recursos naturales (minerales y energéticos) y por otro los efectos de situaciones adversas o indeseadas del medio ambiente y la sociedad sobre las infraestructuras energéticas que, además de los daños causados a estas pueden, a su vez, causar daños ambientales o a la sociedad como deficiencias en la seguridad energética, pérdidas económicas o conflictos sociales de diferente grado de intensidad. En este sentido, tanto la seguridad natural como la seguridad energética con elementos claves a analizar en el diseño de ámbitos de seguridad más complejos como la seguridad de los Estados [11].

Los problemas ambientales asociados al uso de la energía son tan antiguos como el uso masivo de los combustibles fósiles. Quizá el primer caso a gran escala conocido son los efectos del uso de carbón, que desde mediados del siglo XVII era el combustible más utilizado en Londres y su uso fue aumentando espectacularmente con el despliegue industrial de años posteriores. Los productos de la combustión generaban nieblas (smog) que en períodos de estabilidad atmosférica eran intensas y persistentes. Este problema persistió en el tiempo hasta mediados del siglo pasado y en 1952 sucedió el último episodio de gravedad extrema que se calcula que provocó la muerte de 12.000 personas [12]. Sin embargo, los episodios de contaminación de origen energético no son, ni mucho menos, producto de un pasado lejano. En un mundo como el ambiental tan influenciado por el activismo y la opinión pública (tanto desde el punto de vista de su creación como la que llega a calar entre la sociedad), los temas del momento son objeto de máxima atención (en este momento, sobre todo, el cambio climático y la contaminación de los océanos por plásticos) y se dejan en segundo lugar graves problemas que anteriormente estaban en la agenda, pero que no han quedado resueltos. Evidentemente la situación en occidente no es la misma que hace unas pocas décadas, pero aún así en grandes ciudades siguen produciéndose episodios con problemas de calidad de aire que suelen afrontarse con restricciones al tráfico. Otra situación es la que sucede en ciudades de Asia donde los

datos son muy preocupantes. En Delhi (India) la concentración media anual de partículas (PM_{2.5}) fue, en 2018 de 113,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Dhaka (Bangladesh) de 97,1 (la Organización Mundial de la Salud considera una calidad del aire buena hasta 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el índice de calidad del aire de Estados Unidos (*United States Air Quality Index – US-AQI*) lo eleva a 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [13]. Según las Naciones Unidas, la contaminación del aire es el mayor riesgo ambiental para la salud hasta el punto de que en torno a 6,5 millones de personas mueren prematuramente en todo el mundo por esta causa, tanto en lo que se refiere al aire exterior como al interior [14] de viviendas y otros espacios. El peso de la energía en esta contaminación es enorme. De los seis principales contaminantes del aire, en cinco de ellos la aportación de la energía no solo es mayoritaria, sino que es prácticamente total, de forma que esta aportación supone más de un 99% en el caso del SO₂ y de los NO_x, de un 92% en el caso del CO, del 85% en el caso de las PM_{2.5} en el aire y de un 66% en el caso de los compuestos volátiles orgánicos. Únicamente en el caso del amoníaco la aportación de la energía es mínima, de un 3% [14]. Pero los efectos contaminantes de la energía y de la explotación de los recursos naturales no se limita a la atmósfera. En la hidrosfera se producen impactos por vertidos de hidrocarburos y los propios procesos mineros, en el caso de la litosfera se produce también contaminación por hidrocarburos y por metales pesados. Otros daños ambientales son los derivados de incidentes o accidentes en infraestructuras energéticas, como es el caso de vertidos de petróleo en las instalaciones de producción o transporte, los incendios causados por las instalaciones eléctricas.

De forma inversa tenemos los eventos naturales que causan daños en instalaciones energéticas, lo que por un lado puede causar problemas a la seguridad energética y por otro puede producir un daño ambiental. Un ejemplo especialmente dramático de esta situación lo podemos ver en el caso del accidente nuclear de Fukushima, que tuvo lugar después de un terremoto y un posterior tsunami. Sin embargo, las infraestructuras energéticas no solo están amenazadas por fenómenos naturales. Una de las cuestiones fundamentales para la seguridad natural según el alcance definido para esta en este trabajo es la protección de las infraestructuras críticas, es decir, aquellas que su funcionamiento es la base fundamental del adecuado funcionamiento de la sociedad y la economía. La vulnerabilidad de estas infraestructuras es respecto tanto a ataques físicos como virtuales. Estos ataques no solo pueden provocar problemas en el suministro energético, sino también importantes daños ambientales debidos a los problemas causados en las infraestructuras.

Un último aspecto a considerar en la relación entre la seguridad y la energía es el político, y es un aspecto que tiene múltiples dimensiones. Desde ámbitos globales geopolíticos y geoestratégicos que pueden derivar en tensiones internacionales o conflictos de mayor o menor intensidad a ámbitos nacionales, donde la energía y los recursos pueden ser fuente de conflictos (o ser utilizados como justificación o detonante para estos conflictos). En un contexto internacional en el que los niveles más altos de la mayoría de los gobiernos e instituciones internacionales buscan la reducción de la utilización de los combustibles fósiles, la realidad en la calle es que las subidas en los precios de los combustibles son una fuente generadora de conflictos. En noviembre de 2019 en Irán se produjeron violentas protestas con dos muertos por la subida de la gasolina [15], mientras que en octubre la eliminación de los subsidios a los combustibles en Ecuador también provocó protestas en las que murieron cinco personas [16]. En enero de este mismo año en Zimbabue las protestas por las subidas causaron ocho muertos [17]. En 2018, en Francia, en plena Unión Europea que tiene la voluntad de liderar el cambio climático, el anuncio de las subidas de las tasas a los carburantes provocó violentas protestas en París y en otras ciudades del país por parte del movimiento denominado “chalecos amarillos”, que acabaron por conseguir la retirada de la medida por parte del

gobierno [18]. Estas protestas se suceden por todo el mundo: Jordania, 2018 [19], Haití, 2018 [20], Brasil, 2018 [21]. Otra dimensión a considerar en el ámbito político es el de los posibles efectos derivados de la transición energética. Diferentes instituciones en sus informes avalan la creación de empleo por el efecto de la transición energético. Aunque esto sea así en el número neto de puestos de trabajos creados, hay que tener en cuenta que esto no quiere decir que las mismas personas que actualmente tienen trabajo o las mismas comunidades que en la actualidad se benefician de las infraestructuras energéticas existentes vayan a ser las que sigan manteniendo el trabajo o los beneficios con los nuevos modelos energéticos, por lo que si no se adoptan las medidas necesarias para paliar los efectos del desmantelamiento de estas infraestructuras se pueden generar situaciones complejas.

1.4. ASPECTOS GEOPOLÍTICOS Y GEOESTRATÉGICOS DE LA SEGURIDAD NATURAL

Cuando hablamos de geopolítica lo hacemos de una serie de conceptos como diplomacia, seguridad, economía, mercados financieros, acceso a las materias primas, [22] acciones de grupos de interés sobre la sociedad y sobre la opinión pública en el que intervienen gobiernos, instituciones, grandes corporaciones y medios de comunicación y por supuesto, diversos tipos de actores políticos y sociales. Todos estos conceptos están interconectados entre sí y a lo largo de todo el mundo por los fenómenos globalizadores que se tratarán más adelante. En definitiva, la geopolítica define un marco de riesgos y oportunidades que deberá ser gestionado por cada interesado (Estado, Unión Europea, organización regional, organismo internacional, grandes corporaciones, intereses tecnológicos) evaluando sus debilidades y fortalezas, la de sus rivales y la de sus aliados. Sobre esta evaluación se establecen los posicionamientos y actuaciones que mejor sirvan a sus intereses dando así lugar a la geoestrategia.

1.4.1. El cambio climático

En la actualidad, el consenso científico, social e incluso dependiendo de qué regiones del planeta estemos hablando, político, nos dice que el mayor desafío relacionado con la seguridad natural son los efectos del cambio climático. Sin embargo, no en todas las partes del mundo se abordan de la misma manera las interrelaciones entre la seguridad natural y la energía, debido a que esta tiene tal magnitud de importancia que imponer restricciones sobre ella, tanto en su uso como en las fuentes de energía primaria a utilizar, puede ser vista como una desventaja competitiva e incluso como una amenaza para la propia seguridad nacional de un país. En este sentido podemos ver en el caso de los Estados Unidos donde el dominio energético es uno de los cinco aspectos (*Embrace Energy Dominance*) de uno de los cuatro pilares (*Promote American Prosperity*) de la estrategia de seguridad nacional de ese país. En la persecución de ese dominio energético, de acuerdo con esta estrategia, no se está dispuesto a renunciar a ninguno de los recursos energéticos disponibles e incluso contempla las políticas internacionales en materia energética como perjudiciales para la economía y la seguridad energética del país. Entre sus acciones prioritarias se establece la limitación de las restricciones regulatorias que obstaculicen la producción energética [3]. Los criterios establecidos en la Estrategia de Seguridad Nacional de los Estados Unidos son coherentes con el anuncio realizado en 2017 por el presidente Donald Trump sobre la retirada del país del Acuerdo de París. Esta retirada se fundamentaba en la pérdida de empleos (2,7 millones en 2025), caídas en la producción en varios sectores, la imposición de restricciones ambientales a Estados Unidos frente a unas mejores condiciones para otros países con un peor comportamiento medioambiental y lo que él considera una redistribución de la riqueza de Estados Unidos

hacia otros países. Todo ello para unos resultados que prevé como muy pobres aún el caso de un cumplimiento exitoso del acuerdo de París [23]. Debido a las condiciones del acuerdo ningún país puede abandonarlo antes de tres años y con una notificación con un año de antelación a la fecha de salida. En este sentido, el 4 de noviembre de 2019 Estados Unidos envió a las Naciones Unidas la notificación formal de su salida que tendrá efecto el 4 de noviembre de 2020. En la nota de prensa en la que se informa del envío de la notificación se destacan los avances en la reducción de emisiones del país (74% entre 1970 y 2018 y 13% entre 2005 y 2017 en un escenario de crecimiento económico) e insisten en la necesidad de un uso limpio y eficiente de todas las fuentes de energía, incluidos los combustibles fósiles, creando un modelo realista y pragmático [24]. En la intervención de la delegación de los Estados Unidos en la COP25 se confirma la postura descrita hasta ahora por parte del país [25]. En contraposición a la política del gobierno, otras administraciones, empresas e instituciones del país, entre ellas nueve estados, continúan con los compromisos climáticos en sus ámbitos de competencia [26]. Es evidente que esta política energética se enfrenta al consenso científico, político y social de la mayor parte del mundo en lo que respecta a cómo enfrentarse al desafío del cambio climático. Esta estrategia ofrece cierto contraste con la última elaborada por la administración anterior en 2015. En ella la energía también aparece como uno de los ocho aspectos (*Advance our energy security*) de los cuatro pilares (*III. Prosperity*) de la estrategia, pero en el ámbito de la seguridad energética. Se destaca como aspecto positivo la posición de liderazgo de los Estados Unidos en la producción de petróleo y gas y, aunque se compromete a una estrategia baja en carbono, se insiste en el desarrollo de recursos fósiles de forma eficiente que continúe con la reducción de emisiones [4]. Una diferencia fundamental con respecto a la estrategia de 2017 es que afrontar el cambio climático es también uno de los aspectos de la estrategia (*Confront Climate Change*) dentro de uno de los cinco pilares de la estrategia (*Security*) y pone de relieve el Plan de Acción sobre el Clima con el objetivo de reducir las emisiones entre un 26% y un 28% en 2025 respecto a los niveles de 2015.

China oficialmente reconoce la necesidad de la lucha contra el cambio climático. Uno de los últimos documentos al más alto nivel que confirma esta posición es el “Llamamiento de Pekín sobre la conservación de la biodiversidad y el cambio climático” que es una declaración conjunta de los presidentes de China y Francia (Xi Jinping y Emmanuel Macron) en la que reafirman el apoyo de los dos países al Acuerdo de París, lo consideran irreversible, se comprometen a publicar en 2020 sus estrategias a largo plazo de desarrollo con bajas emisiones y reclaman una aportación de 100.000 millones de dólares a los países desarrollados hasta 2020 a través del Fondo Verde del Clima (*Green Climate Fund – GCF*) para los países en desarrollo tal y como estaba previsto en el Acuerdo de París y superar esa cantidad anualmente hasta 2025 [27]. Previamente en el marco de la cumbre UE-China de 2018 tiene lugar la Declaración de Líderes UE-China sobre cambio climático y energía limpia en la que se reflejan los compromisos de China y la colaboración de este país con la UE ya establecida en documentos anteriores como la Declaración Conjunta UE-China sobre cambio climático de 2015 y la Hoja de Ruta UE-China sobre Cooperación Energética de 2016. Esta postura oficial de China hace que en los últimos tiempos se hable de su liderazgo en la lucha contra el cambio climático. Sin embargo, China fija esta posición desde su situación de país en desarrollo (no anexados al anexo I de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) [28], [29], [30] que le permite acceder a los mecanismos de flexibilidad que los países desarrollados no tienen, siendo esta una de las razones esgrimidas por Estados Unidos para su abandono del Acuerdo de París por la desventaja competitiva con su gran competidor económico. Y es precisamente en ese ámbito económico donde se genera la

incertidumbre del futuro del compromiso de este país en la lucha contra el cambio climático. El incremento del PIB de China en 2018 fue del 6,6% después de descensos constantes desde el final del último período de aumento del crecimiento en 2007 (14,2%), a excepción de 2010 con un 10,6% respecto al 9,4% del año anterior. La variación anual en el tercer trimestre de 2019 fue del 6,0 % [31] y hay previsiones en las que continúa el descenso en el crecimiento hasta situarse en el 5,8% en 2020 [32]. La realidad es que en la actualidad el Climate Action Tracker califica el desempeño de China como altamente insuficiente (*Highly Insufficient*), lo que significa que la política climática del país supondría aumentos de entre 3°C y 4°C [33]. En la Figura 1 podemos ver que tras un ligero descenso entre 2013 y 2016 las emisiones aumentan notablemente en 2017 y 2018 (un 1,20% y un 2,11% respectivamente) [34]. Este aumento en las emisiones junto con el comienzo en 2018 de la construcción de 28 GW en nuevas centrales de carbón [34] justifican la clasificación citada. El contraste entre la posición oficial de China y su desempeño en materia climática puede hacernos reflexionar acerca de si el rol de liderazgo contra el cambio climático que últimamente se le atribuye a China tiene más bien un carácter estratégico, en el sentido en el que, una vez que los Estados Unidos abandonan el Acuerdo de París, una excesiva presión sobre China que provoque su abandono o una relajación de sus NDC dejaría el acuerdo en papel mojado.

En lo que respecta a la Unión Europea, sus objetivos a medio y largo plazo serán ampliamente detallados en el siguiente capítulo. A nivel estratégico, desde los comienzos de la lucha contra el cambio climático ha intentado, y conseguido, situarse en una posición de liderazgo y ha realizado grandes esfuerzos para situar la cuestión climática entre las prioridades a nivel mundial. Adicionalmente a los objetivos climáticos ya declarados, la Comisión Europea acaba de emitir la Comunicación COM(2019) 640 El Pacto Verde Europeo, mediante el que se quiere garantizar la neutralidad de emisiones en 2050, elevando los objetivos previstos para 2030 a reducciones de entre el 50% y el 55% respecto a 1990 utilizando como una de las herramientas necesarias la modificación del Régimen de Derechos de Emisión extendiéndolo a sectores a los que actualmente no aplica y estableciendo mecanismos que corrijan los efectos de emisiones de CO₂ fuera de la Unión Europea y que correspondan a importaciones hacia ella para paliar los efectos deslocalizadores. El alcance del Pacto Verde Europeo va más allá de los aspectos climáticos y pretende profundizar en la reducción de la contaminación, fomentar los sistemas de producción industrial y tecnologías limpias y establecer un proceso de transición justa e integradora. Para ello se estima necesaria una inversión de 260.000 millones de euros anuales hasta 2030 [35].

Los últimos dos países que superan el 5% de emisiones de dióxido de carbono son Rusia e India, y son casos opuestos en lo que respecta al desempeño de sus políticas climáticas. Rusia acaba de ratificar el Acuerdo de París (Oct 2019) tal y como anunció en la Cumbre para la Acción Climática de septiembre de 2019 y es probable que cumpla sus objetivos, pero debido a la debilidad y falta de ambición de sus NDC [33], [36] (Figura 1 y Figura 2). Existe un proyecto de ley que impone límites y prevé comercio de emisiones para los grandes emisores para 2025 [36], sin embargo hay noticias de la posibilidad de que esta legislación se reduzca a una auditoría de emisiones cada cinco años, sin que esté clara la existencia de penalizaciones [33]. Además, la caída en las emisiones informada parece que tuvo problemas con los criterios utilizados que tuvieron que ser corregidos [33]. El caso de India es completamente diferente. Además de tener unos objetivos ambiciosos, la puesta en marcha de su Plan Nacional de Electricidad le va a permitir alcanzar el objetivo del 40% de producción eléctrica renovable con una década de antelación. No obstante, tiene mucho recorrido de mejora en el ámbito de la producción

eléctrica por carbón todavía en expansión (90 GW adicionales contemplados en su Plan Nacional de Electricidad) [33], [36].

En definitiva, a nivel geoestratégico, la posición de los principales emisores de gases de efecto invernadero la podríamos resumir de la siguiente forma. Estados Unidos abandona el Acuerdo de París porque ve en él una desventaja competitiva respecto a su principal competidor económico, China, que como país en desarrollo dispone de mayor flexibilidad en sus NDC. Por su parte, China, en su postura oficial, se mantiene en una posición de liderazgo frente al cambio climático, pero dotada de la flexibilidad citada. Por otro lado, está por ver el efecto que la disminución en su crecimiento económico pueda tener en su política climática. La Unión Europea, por su parte, ha encontrado en la lucha contra el cambio climático una oportunidad de liderazgo a nivel mundial que en los últimos años le fue complicado alcanzar debido a la diversidad de intereses de los países miembros en diferentes ámbitos. La recientemente conformada nueva Comisión Europea pretende darle una vuelta de tuerca a los objetivos climáticos. Esta mayor ambición debe ser gestionada con cautela ya que existen países miembros todavía muy dependientes del suministro de gas e incluso algunos países con una producción eléctrica con el carbón como fuente de energía primaria muy elevada (81% en 2015 en el caso de Polonia). En el caso de Rusia las políticas climáticas son escasísimas mientras que India supone un caso exitoso debido a la alta penetración de la producción eléctrica renovable.

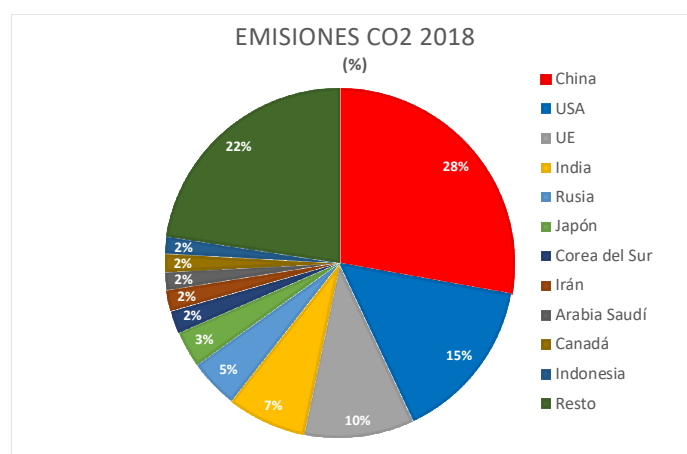
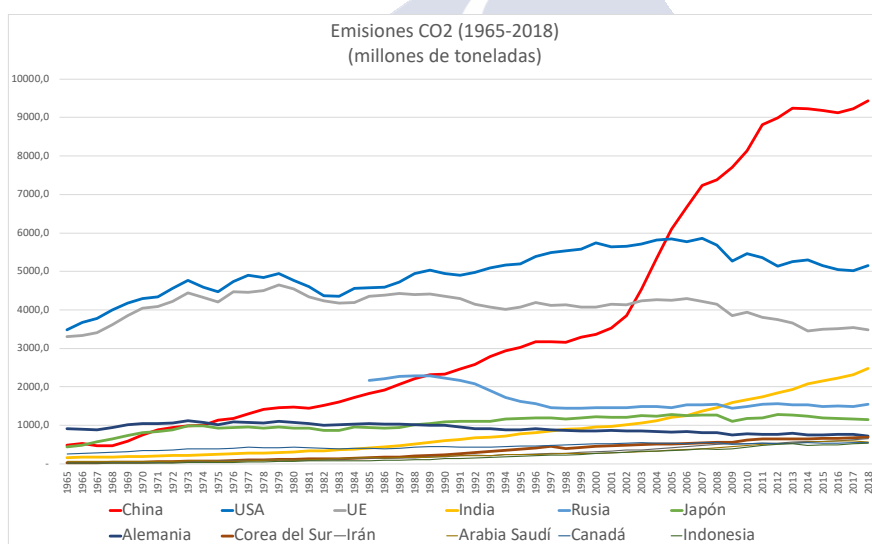


Figura 1: Principales emisores de CO₂
Elaboración propia a partir de [34]

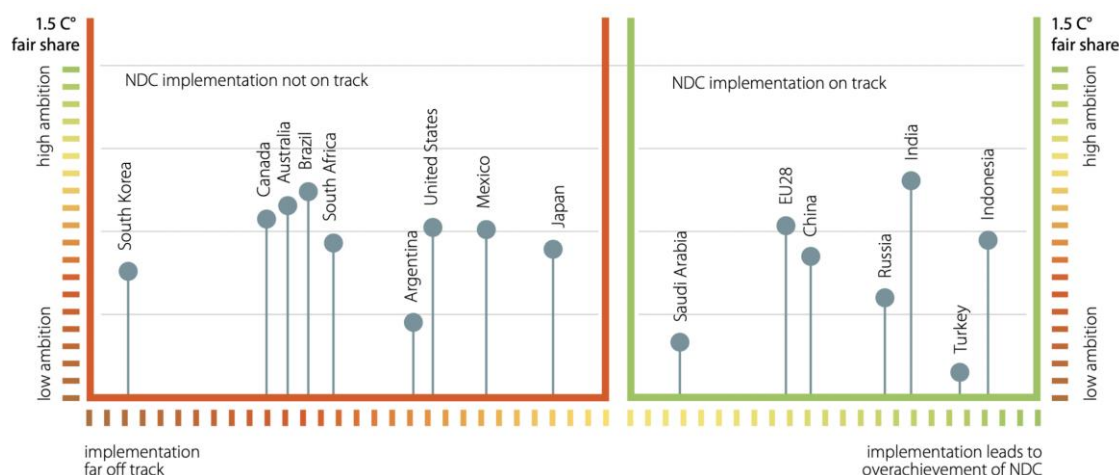


Figura 2: Medida de la ambición de los NDC de los países del G20 con relación al objetivo de 1,5°C [36]

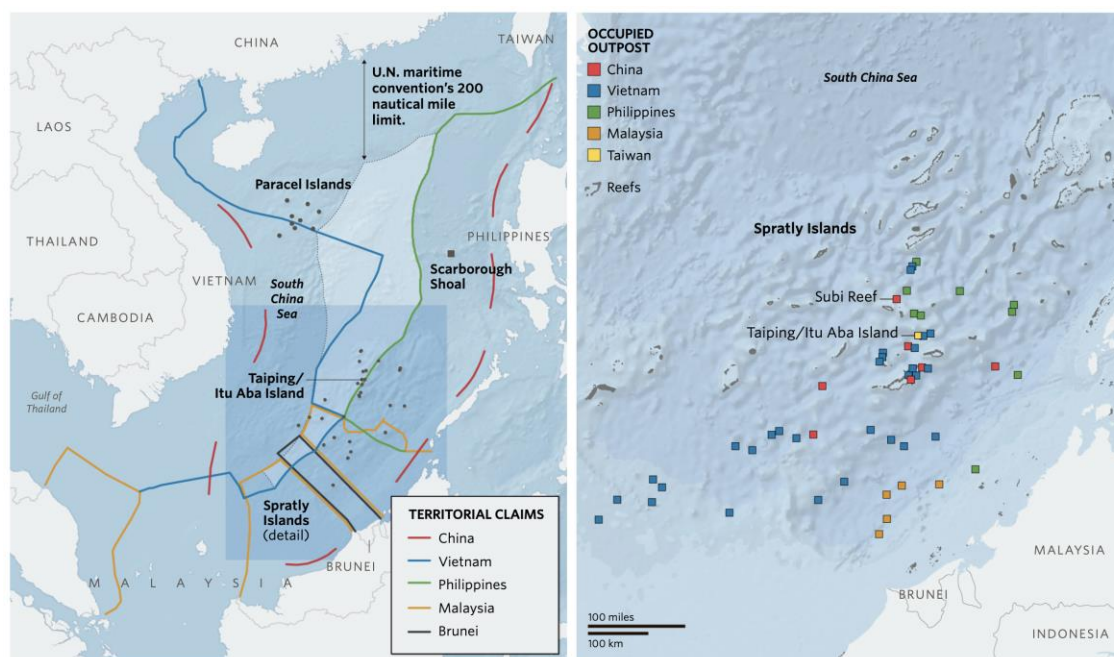
A la vista de que no parece que ni a corto ni a medio plazo se vaya a prescindir de los combustibles fósiles será necesario establecer los mecanismos de mitigación necesarios para el cumplimiento de los objetivos climáticos. A tal efecto, para este tipo de combustibles no parece que haya muchas más alternativas a la captura, almacenamiento y utilización del dióxido de carbono, al que se dedica el capítulo cinco de esta tesis. Aunque inicialmente se planteó esta tecnología como un importante método de mitigación, las políticas posteriores apostaron directamente por el abandono de los combustibles fósiles. Sin embargo, las posturas de los principales emisores que se han descrito en párrafos anteriores hacen que sea muy poco realista pensar en un abandono incluso a largo plazo. Por otro lado, el informe del IPCC de 2018 sobre la conveniencia de la adopción del incremento máximo de temperatura de 1,5°C hace necesaria la intensificación de todas las medidas disponibles para la reducción de las emisiones, lo que ha vuelto a poner sobre la mesa la captura, almacenamiento y utilización de CO₂.

1.4.2. Los recursos como fuente de conflictos

La relación entre los recursos y los conflictos está muy documentada. Según las Naciones Unidas al menos el 40% de los conflictos intraestatales ocurridos en los últimos 60 años tienen relación con los recursos naturales [37]. Es cierto que, en muchas ocasiones, estos conflictos tienen una base étnica, religiosa, histórica o de cualquier otro tipo de rivalidad previa. Sin embargo, estas cuestiones que podían estar olvidadas o, en el peor de los casos, latentes vuelven a cobrar importancia o se usan como agitación cuando o bien aparece una importante fuente de recursos, cuando hay escasez de algún recurso necesario o cuando se argumenta (sea cierto o no) un reparto injusto de los beneficios obtenidos por el comercio de los recursos existentes. Otro aspecto que relaciona los recursos naturales con los conflictos es que en muchos casos estos recursos financian la existencia de conflictos. Por último, también es muy relevante los efectos sobre la seguridad natural de las acciones militares durante los conflictos.

Históricamente, los conflictos están relacionados con los recursos no renovables convencionales, fundamentalmente petróleo y gas. De hecho, la práctica totalidad de los principales países productores han tenido en algún momento algún tipo de conflicto, ya sea un conflicto bélico abierto con otros países o la presencia de guerrillas en su territorio [38]. Es difícil abordar los conflictos que tuvieron lugar en el golfo pérsico sin la presencia de los recursos petrolíferos en la zona y es también difícil separar estos conflictos de los posteriores ataques terroristas del 11 de septiembre en Estados Unidos, la posterior guerra de Afganistán, y el ascenso del ISIS y su implicación en múltiples conflictos posteriores. Un caso más reciente de la influencia del dominio de los recursos petrolíferos y de gas en la generación de conflictos es la nueva guerra civil en Libia. Las tradicionales rivalidades regionales y étnicas, que ya existían desde la ocupación italiana [39] se han intensificado debido a que la mayoría de los yacimientos de petróleo y gas se encuentran en zonas del interior y las tribus de los territorios en los que se encuentran los recursos consideran que no perciben un retorno justo de la riqueza que aportan [40] y a la vez el conflicto se ve alimentado por los recursos económicos que aporta el petróleo. El conflicto se ve agravado por la presencia de terroristas del ISIS y Al-Qaeda aprovechando el vacío de seguridad en el sur del país para la defensa de Trípoli por parte de las fuerzas occidentales [41]. Como hemos podido comprobar, los efectos de estos conflictos son devastadores a nivel humano, social y económico. Pero también a nivel ambiental donde los efectos sobre la biota, los hábitats y la salud y actividades humanas son muy graves derivados de las acciones de guerra, en muchos casos, sobre infraestructuras energéticas.

A nivel prospectivo, estos recursos seguirán estando entre los orígenes o los detonantes de los conflictos, pero es necesario considerar también el papel que jugarán en el futuro los recursos no renovables no convencionales, entendiendo estos los utilizados tanto en nuevas tecnologías, en particular en el ámbito energético, incluida la producción renovable. Tanto en el ámbito energético como en cualquier otra tecnología que vaya a desempeñar un papel fundamental en el futuro inmediato de la sociedad son necesarios determinados recursos minerales que los gobiernos denominan materias primas críticas, a lo que se dedican varios apartados del capítulo cuatro de la tesis. Estos recursos, como se describe en ese capítulo, no están uniformemente distribuidos por el planeta, sino que, como siempre suele suceder, existen importantes concentraciones en determinados puntos. Podemos poner el ejemplo del cobalto del que el 60%, en la actualidad, se produce en la República Democrática del Congo, que ya sufre conflictos debido a los ingresos derivados de la minería [42]. El cobalto es un componente fundamental de las baterías de litio. El asunto de las materias primas críticas es abordado en esta tesis desde el punto de vista de su obtención en los fondos marinos, pero aunque efectivamente la mayor parte de los fondos oceánicos pertenece a la jurisdicción internacional, esto no quiere decir que no haya posibilidad de conflictos en zonas donde actualmente ya hay disputas, como en el Ártico o en el Mar del Sur de China [42]. En este último caso, China demanda soberanía sobre zonas marítimas donde se estima que hay 11 mil millones de barriles de petróleo y 2,38 billones de metros cúbicos de gas natural y se encuentra con reclamaciones rivales de Brunei, Indonesia, Malasia, Filipinas, Taiwán y Vietnam [43] (Figura 3).



Sources: Center for Strategic and International Studies (claim boundaries); U.S. Department of Defense (outposts)

Figura 3: Disputas en el Mar del Sur de China [44]

Reproducido con permiso de Dow Jones & Company, Inc., de The Wall Street journal, WSJ News Graphics, News Corporation.; Dow Jones & Co., 2015; permiso transmitido a través de Copyright Clearance Center, Inc.

En el caso de los recursos minerales el conflicto característico es el que se citaba anteriormente de la República Democrática del Congo. Incluso se ha definido el término “minerales de conflicto” como aquellos que juegan un papel fundamental en los conflictos armados y abusos sobre los derechos humanos en varias provincias orientales de la República Democrática del Congo [45], y se conocen también como 3T: Tantalio (Ta) (*Tantalum*), Estaño (Sn) (*Tin*), y Tungsteno (W) (*Tungsten*). En el caso de añadir el Oro (Au) (*Gold*) se conocen como 3TG. En este sentido se ha desarrollado legislación para garantizar que los productos no contienen “minerales de conflicto”. En concreto en Estados Unidos, la Ley *Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection* de 2010, en particular la sección 1502. En el caso de la Unión Europea, se desarrolló el Reglamento (UE) 2017/821 para estos minerales. En ambos casos uno de los elementos fundamentales se basa en el proceso de diligencia debida que consiste en un proceso continuo, proactivo y reactivo por el que se garantiza que se respetan los derechos humanos y no contribuyen a los conflictos [46].

1.5. LA HIPERGLOBALIZACIÓN COMO MARCO DE ACTUACIÓN SOBRE LA SEGURIDAD NATURAL

Podemos entender la globalización como un proceso que reduce las distancias no físicas entre los diferentes países y regiones y aumenta la interdependencia que contrasta con la fase previa de mundialización, en la que las relaciones parten de un centro dominante y unas colonias que, independientemente de los aspectos positivos que pudiera tener la relación con la metrópoli, sufrían la explotación de sus recursos en beneficio de esta. La globalización se desarrolla y alcanza su máxima expresión con el uso de las tecnologías de la información y, a medida que la capacidad y el uso de estas se intensifican y alcanzan nuevos niveles de desarrollo nos encontramos con una situación de hiperglobalización

que aumenta todavía más el nivel de interdependencia [1] entre los países, instituciones y empresas. Este elevadísimo nivel de interacción entre las sociedades tiende a provocar procesos de homogeneización [1] con aspectos positivos como el crecimiento económico global y la mejora desarrollo humano (aunque ni muchos menos de forma uniforme). En este sentido podemos ver como la fuerte aceleración del crecimiento económico mundial no tuvo lugar hasta la década de los 60 del pasado siglo (Figura 4) [47], coincidiendo con los cimientos de lo que posteriormente conoceríamos como globalización.

Estos procesos de homogeneización tienden a converger hacia el modelo de sociedad occidental, lo que en buena medida es positivo ya que ha propagado la idea de democracia [1] por todo el mundo, pero en lo que respecta a la seguridad natural tiene matices. Y es que la población de los países en desarrollo tiene la aspiración de lograr una forma de vida lo más parecida posible al modelo social de occidente, por lo que sus gobiernos e instituciones quieren reproducir los procesos que llevaron a este a su situación de gran desarrollo económico, humano, tecnológico, científico y social. El problema es que esos procesos supusieron (y suponen) un consumo ingente de recursos que, según el consenso científico mundial, han llevado al planeta a una situación de stress climático que amenaza, según la mayoría de los expertos, nuestra forma de vida. Sería interesante analizar si es posible otro modelo social que permita alcanzar los niveles de desarrollo que conocemos. De hecho, los intentos de implantación de sistemas alternativos han supuesto importantes retrocesos en los niveles de desarrollo, que en algunos casos como China han podido corregir acercando el sistema económico a parámetros occidentales y a día de hoy, a pesar del enorme crecimiento económico durante años y de su potencia industrial, sigue siendo un país con enormes desigualdades y desequilibrios internos. El caso es que a nivel global nadie plantea un sistema alternativo al occidental, sino que únicamente se plantean cambios tecnológicos y de uso de la energía menos lesivos para el medio ambiente. Pero no nos podemos engañar. Estos cambios van a seguir requiriendo el uso a gran escala de recursos, en algunos casos nuevos, que probablemente redefinirán situaciones de interdependencia. Esta gran cantidad de recursos únicamente podrá ser mitigada con las prácticas propias de la economía circular.

La globalización e hiperglobalización han generado y a la vez son consecuencia de diferentes instituciones internacionales. Empezando por la ONU y algunas de sus convenciones que en la práctica funcionan como organismos con estructura propia como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, cuyo órgano supremo de toma de decisiones es la Conferencia de las Partes (*Conference of the Parties – COP*) [48]. Además, existen 15 organismos especializados de la ONU que están vinculados a ella mediante acuerdos intergubernamentales, aunque son independientes de la ONU y tienen su presupuesto, normas y personal [49]. Además de esto existen fondos y programas, institutos de investigación, órganos conexos, etc. (Figura 5). Dentro de estos entes se encuentran instituciones tan vinculadas generalmente con el concepto de globalización como la Organización Mundial del Comercio (OMC) (órgano conexo), el Fondo Monetario Internacional (FMI) y el Grupo del Banco Mundial (organismos especializados).

Existen además entidades de carácter regional, como la Unión Europea, al que sus miembros han cedido parte de su soberanía nacional y legislan para todos sus miembros y actúan a nivel internacional en nombre de ellos. Otros organismos con características comunes como la Unión Africana, Mercosur, el Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) no han llegado a los niveles de integración de la Unión Europea. También tienen lugar tratados de libre comercio entre diferentes regiones y países con el fin disminuir o eliminar cargas al intercambio de bienes y servicios, como el Espacio

Económico Europeo (EEE) o el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (*North American Free Trade Agreement* – *NAFTA*) (Figura 6).

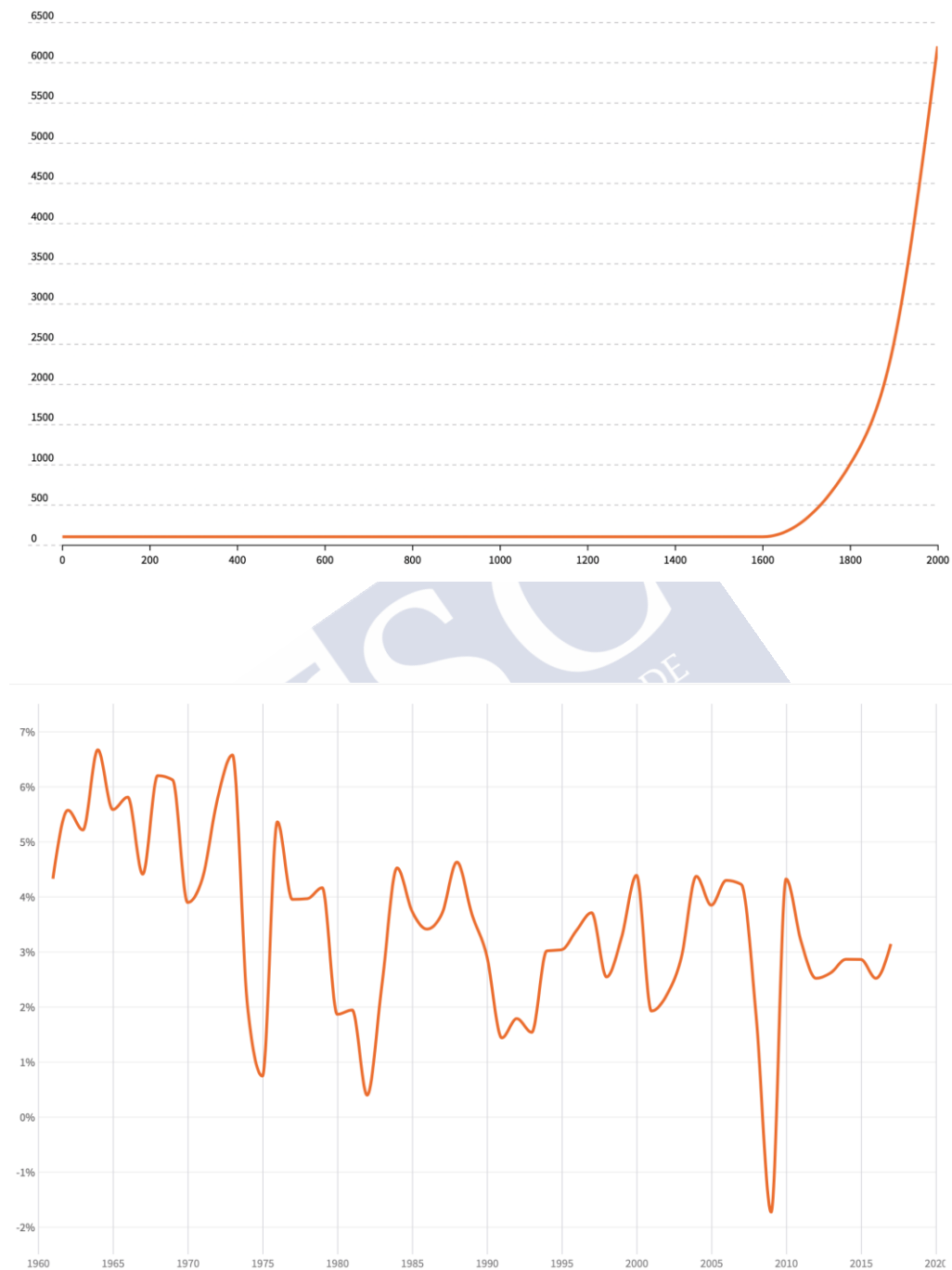


Figura 4: Crecimiento económico mundial (histórico) - Figura inferior: detalle crecimiento desde 1960 [47]

Reproducido con permiso de ING Bank. Fuente: "Statistics on World Population, GDP, and Per Capita GDP, 1-2008 AD", Angus Maddison, IMF



Figura 5: El sistema de las Naciones Unidas [50]

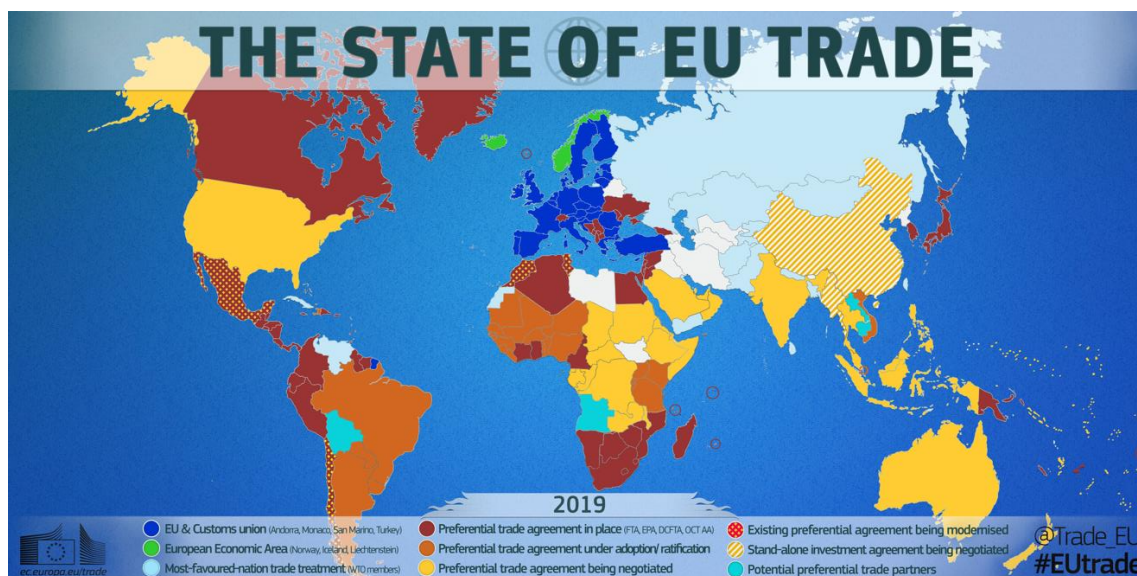


Figura 6: Estado de los tratados de libre comercio de la UE [51]

Por otro lado, también existen organizaciones sectoriales como la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP, *Organization of the Petroleum Exporting Countries – OPEC*) cuya función es regular la producción de petróleo de los países miembros y uno de sus principales objetivos es controlar sus precios. El auge de la producción de petróleo no convencional (*shale/tight oil*) en Estados Unidos en los últimos años dificulta este control de precios ya que, aunque por ahora el coste de producción de este recurso es superior al convencional, en cuanto el precio de los países de la OPEP sube, el petróleo no convencional americano entra en rentabilidad con lo cual se limitan los precios al alza del petróleo de la OPEP. Además, estos costes de producción están en caída ya que, si entre 2012 y 2014 el *breakeven* estaba próximo a 80 dólares, en 2018 ha caído a 50 dólares de media y en determinadas zonas de la Cuenca Pérmica están ya a 46 dólares [52].

Otro elemento globalizador son las inversiones que realizan las potencias económicas en otras partes del mundo, generalmente en países que disponen de los recursos naturales que necesitan para el desarrollo de su economía y de su industria [53]. Dentro de este tipo de elementos globalizadores podríamos enmarcar la Nueva Ruta de la Seda (*One Belt, One Road – OBOR*), que consiste en un enorme proyecto de inversiones en diferentes tipos de infraestructuras (entre los que se encuentran infraestructuras energéticas) a lo largo de numerosos países con una inversión aproximada de 900 mil millones de dólares [54]. Además de un elemento que pretende crear “una nueva era de globalización” [55] la Nueva Ruta de la Seda tiene un fuerte componente geoestratégico que por un lado pretende aprovecharse del retroceso de Estados Unidos en aspectos relacionados con el libre comercio y la lucha contra el cambio climático y las inversiones asociadas a él y por otro proporciona a China una posición dominante sin tener que afrontar los gastos militares que proporcionan esa posición a los Estados Unidos [54].

Un último elemento globalizador a considerar son los diferentes foros en donde se marcan las tendencias de actuación sobre las acciones políticas y económicas a llevar a cabo en el mundo en los siguientes años. En este grupo podríamos encuadrar a la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, *Organization for Economic Co-operation and Development, OECD*), que reúne a los países industrializados, el G-20 y el G-7 que agrupan a las mayores economías del mundo.

También se puede incluir en este grupo al Foro Económico Mundial (*World Economic Forum - WEF*) conocido también como el Foro de Davos, donde el tema de 2019 fue “Globalización 4.0: formando una arquitectura global en la era de la Cuarta Revolución Industrial” [56], mientras que el Manifiesto de Davos de 2020 es “El propósito universal de las empresas en la Cuarta Revolución Industrial” [57].

Todo lo descrito hasta ahora describe el entramado que sustenta la globalización cuyas fortalezas deben ser aprovechadas para el reforzamiento de la seguridad natural y energética. Las tecnologías de la información y de la comunicación en las que se cimenta la globalización son una herramienta fundamental para el desarrollo del conocimiento de forma que, por ejemplo, tecnologías que anteriormente no eran equiparables a las convencionales en términos de rentabilidad hayan igualado a estas lo que está provocando una cada vez mayor proporción de producción eléctrica renovable dentro de los sistemas eléctricos. Pero esta transmisión de información no solo afecta al conocimiento científico y técnico, sino también al conjunto de la sociedad, que cada vez es más consciente de la necesidad de intervenir en los procesos actuales para modificarlos o sustituirlos por otros compatibles con la sostenibilidad. Este flujo de información hacia y entre la sociedad, bien canalizado, puede ser un elemento fundamental para que la gran mayoría de la sociedad exija los cambios necesarios y los gobiernos e instituciones con capacidad decisoria actúen de forma más enérgica, teniendo en cuenta los beneficios, no solo climáticos, sino económicos a medio y largo plazo y no estar tan focalizados simplemente en los datos de crecimiento a corto plazo. Los escasos resultados de la COP25 han sido consecuencia en gran medida debido a la imposibilidad de alcanzar un acuerdo para la regulación de los mercados de carbono [58], lo que evidencia la dificultad para poner de acuerdo a tantos países que, aunque deberían tener el objetivo común de mitigar los efectos del cambio climático, tienen intereses dispares a corto plazo. Una vez constatada la dificultad que tienen los gobiernos para implementar las medidas necesarias, debe ser el resto de la sociedad la que, aprovechando las estructuras y las herramientas de la globalización, tome el protagonismo. En este sentido existen iniciativas como la ya mencionada *We are still in* en la que empresas y organismos de diferentes ámbitos, incluidos gobiernos estatales y locales continúan con los compromisos del Acuerdo de París en sus ámbitos de competencia. En esta ocasión las empresas van por delante de los gobiernos e impulsan iniciativas como la Alianza de Directores Líderes del Clima, que representan a empresas con ingresos que en total superan los 1,5 billones de dólares y se han comprometido a continuar con las reducciones de emisiones más allá del 9% que llevan recortado desde 2015 [59]. No obstante, la globalización también tiene aspectos negativos para la seguridad natural. La interconexión de todos los sistemas puede hacerlos vulnerables a ciberataques que pueden afectar a infraestructuras críticas (centros de control de infraestructuras energéticas, centrales nucleares, importantes nodos de conexión de redes de transporte y distribución, etc.), que también se pueden ver afectadas por ataques físicos por parte de actividades terroristas que se ven intensificadas por un mayor alcance de la propaganda que las cimenta. Otros aspectos negativos se refieren a la explotación de los recursos naturales de los países pobres que disponen de ellos. Este no es un fenómeno nuevo, pero la hiperglobalización no ha conseguido su erradicación y las necesidades de materias primas críticas para el desarrollo de las nuevas tecnologías sigue afectando negativamente a la población local en forma de trabajos realizados en condiciones peligrosas y por trabajo infantil. Otro efecto indeseado de la globalización es la deslocalización de la producción a países que no solo disponen de mano de obra más barata, sino que sus requisitos asociados con la seguridad natural y con los derechos de los trabajadores en particular y derechos humanos en general son más laxos. En este sentido el Pacto Verde Europeo va en la dirección correcta al prever mecanismos para el

control de las emisiones de los productos fabricados fuera de la Unión Europea pero que están destinados a los consumidores de esta. Este tipo de medidas correctoras de los desequilibrios de la globalización tendrían que ser extendidos al mayor número de efectos indeseados de esta, sobre todo en lo relacionado con los derechos humanos y la protección del medio ambiente.

Además de los aspectos negativos de los procesos globalizadores, o precisamente debido a algunos de estos aspectos negativos, cabría preguntarse sobre la posibilidad de cierto agotamiento del modelo que ha llevado a algunos de los más importantes elementos tractores de la globalización, en particular a Estados Unidos o el Reino Unido, a un importante repliegue interno dejando espacios vacíos en los que intentarán situarse otras potencias. En este sentido es interesante la posición pública de China con relación a la lucha contra el cambio climático y el uso de esta lucha como una palanca de posicionamiento de liderazgo mundial, que en definitiva debería disputar (o de forma muy improbable compartir, ya que los liderazgos no se suelen compartir) a la Unión Europea. En definitiva, esta visión conllevaría el tratamiento de la lucha contra el cambio climático, por un lado, como otro elemento globalizador más, con su componente de reparto de riqueza debido a la asimetría de las obligaciones que el Tratado de París fija para los diferentes países y por otro, a nivel geoestratégico, un punto de apoyo para el intento de reposicionamiento de liderazgos mundiales. En contra de China juega la falta de capacidad que hasta la fecha ha mostrado para imponerse a Estados Unidos y que se evidencia en su estrategia de poder blando. Como se ha demostrado a lo largo de la historia el liderazgo mundial está apoyado en una fuerte capacidad militar que pueda afianzar la posición en el caso de que aparezcan rivales capaces de competir con los elementos sobre los que actúa el poder blando, o que estos elementos pierdan relevancia en la agenda mundial. En lo que respecta a la Unión Europea esta no ofrece ningún elemento esencial que la coloque en posición de liderazgo global. Más allá de un mercado único de una importante población con un nivel adquisitivo alto y del carácter de democracias avanzadas de los sistemas de gobierno de sus integrantes (aún teniendo en cuenta las últimas fricciones con países de Este) no existen elementos de cohesión suficientes que proporcionen, y sobre todo transmitan a nivel internacional, una posición homogénea y de fortaleza como bloque que requiere una posición de liderazgo. Las muestras de debilidad de la Unión Europea en este sentido son manifiestas y se han agravado en los últimos años. La respuesta de la Unión a la crisis económica de 2008, con unas condiciones de rescate con gran afectación a la población de algunos países, la salida del Reino Unido de la UE, y la respuesta hasta el momento a la crisis sanitaria provocada por la pandemia de COVID-19 y a la más que probable crisis económica que le seguirá son los eventos más importantes que ponen de manifiesto la división interna y que ponen en peligro los enormes logros de la Unión.

1.6. SEGURIDAD NATURAL Y SOSTENIBILIDAD

Aunque en el capítulo 2 de la tesis se aborda de forma profunda la relación entre la seguridad natural y la sostenibilidad, a modo introductorio parece necesario evaluar la relación tanto de los aspectos generales de la seguridad natural como de las particularidades analizadas en esta tesis con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. En realidad, es difícil encontrar alguno de los ODS que no esté afectado e incluso existan interrelaciones entre diferentes ODS, dada la amplitud de la relación energía-recursos-seguridad, por lo que en este punto se citarán las relaciones más directas y evidentes:

ODS 6 “Agua limpia y saneamiento”: Se han introducido anteriormente los impactos de la producción y el transporte de energía, así como la extracción de recursos en la hidrosfera (apartado 1.4.2).

ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”: La propia naturaleza del ámbito de estudio hace evidente la relación con este objetivo.

ODS 8 “Trabajo decente y crecimiento económico”: En lo que respecta a este punto se podrían destacar varios puntos. En primer lugar, los aspectos relacionados con los derechos laborales e incluso humanos en la extracción de minerales que afectan a los países más pobres. En segundo lugar, la problemática ya citada de la necesidad de una transición energética justa que no deje atrás a personas y a comunidades. En lo que respecta al crecimiento económico, destacar las oportunidades que suponen las grandes inversiones que se están realizando y que se realizarán en el futuro próximo en el despliegue tecnológico asociado a la transición energética. Este último aspecto enlaza con el ODS 9 “Industria, Innovación e Infraestructura”.

ODS 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles”. El desarrollo tecnológico asociado a la seguridad natural es, sin duda, un elemento que contribuye de forma decisiva a una mayor sostenibilidad de las ciudades y de todo tipo de comunidades. El desarrollo de infraestructuras inteligentes, como por ejemplo en el caso de la red de distribución de electricidad descrita en el capítulo 3 de la tesis, es un claro ejemplo en este sentido.

ODS 12 “Producción y consumo responsables”. En el ámbito de la seguridad natural este objetivo se relaciona directamente con los ODS 6 y 7 ya definidos anteriormente y con el ODS 13 que vemos a continuación.

ODS 13 “Acción por el clima”. Es uno de los mayores retos de la seguridad natural y el foco de todas las miradas por la gravedad de los efectos del cambio climático. En este sentido, en el capítulo 5 se abordan tecnologías de captura y utilización del dióxido de carbono como elementos mitigadores.

ODS 14 “Vida submarina”. Los recursos minerales y energéticos marinos es uno de los temas centrales de la tesis, que se aborda en el capítulo 4.

ODS 15 “Vida de ecosistemas terrestres”. La definición de seguridad natural realizada en este trabajo está intrínsecamente unido a todos los aspectos medioambientales.

ODS 16 “Paz, Justicia e Instituciones Sólidas”. El propio concepto de seguridad está asociado a este ODS. Hemos visto en apartados anteriores la relación entre la energía y los recursos con los conflictos y con los derechos humanos, ya citados en el ODS 8. No es posible ni la paz, ni la justicia ni las instituciones sólidas sin la presencia de la seguridad en la sociedad.

1.7. LA GRAN ESPERANZA A LARGO PLAZO: LA FUSIÓN NUCLEAR.

Las grandes dificultades con las que se han encontrado las energías renovables para su implantación están relacionadas con su coste, su rendimiento (entendiendo como tal los recursos económicos, tecnológicos, de espacio, etc. con relación a la energía obtenida) y una producción con un alto grado de variabilidad. Es cierto que algunos de estos aspectos, en particular el coste de las instalaciones, han ido mejorando, pero muy probablemente sin el consenso alcanzado en materia climática, que les está dando un fuerte impulso, les haría extremadamente difícil competir con las fuentes de energía tradicionales. A nivel de efectos climáticos no existe ninguna duda de que la energía nuclear implantada actualmente no tiene competidor por la capacidad de producción, estabilidad en esta y capacidad de regulación del sistema eléctrico, pero también es verdad que tiene inconvenientes, pocos, pero muy importantes y que suponen una grave amenaza para la seguridad natural. Por un lado, en un régimen de funcionamiento normal la gestión de los

residuos es extremadamente compleja y poco efectiva dada la vida de los residuos radioactivos y, por otro lado, como se ha demostrado en los gravísimos eventos de Chernóbil y Fukushima, la tecnología nuclear actual puede constituir una amenaza de carácter catastrófico para la seguridad natural.

En definitiva, la gran esperanza sería, por una parte, para la producción masiva de energía estaría en la tecnología de fusión nuclear y por otra el hidrógeno como portador de energía.

En la tecnología de fusión nuclear la mejor alternativa parece la fusión nuclear de deuterio-tritio que, aunque la liberación de energía que produce la fusión es menor que en el caso del hidrógeno, sus barreras de potencial son inferiores a las de este y, por lo tanto, la temperatura de calentamiento del plasma también es inferior. En el proceso se producen residuos de litio que, a pesar de seguir generando aspectos relacionados con su gestión, estos no son comparables a los residuos de la tecnología de fisión ya que la vida media del tritio es solo de 12,7 años [60]. Las perspectivas en este sentido son que en el entorno de 2035 estará disponible un reactor de demostración para ya en el año 2050 disponer de producción comercial con tecnología de fusión nuclear [61].





2. SEGURIDAD NATURAL, SEGURIDAD ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD

2.1. INTRODUCCIÓN

La seguridad medioambiental se puede entender como la dimensión de la seguridad derivada de los riesgos ambientales, ya sean estos debidos a la acción propia de la naturaleza o derivados de las actividades y procesos humanos. Frente a la acción propia de la naturaleza la estrategia para hacer frente a los riesgos es exclusivamente la adopción de procesos de adaptación que mitiguen los efectos. Es en la dimensión antropogénica donde podemos encontrar una visión más amplia del término para incluir en el concepto el estudio de la prevención de las alteraciones medioambientales, la mitigación de los impactos inevitables y, como en el caso de los riesgos propios de la naturaleza, la adaptación a las irreversibilidades. La seguridad natural tiene múltiples vertientes. Podemos citar por ejemplo el caso de las biotoxinas donde se ha observado una expansión en su distribución en el planeta debido a que algunos de los tipos más tóxicos se desarrollan en aguas cálidas y el aumento de la temperatura del mar favorece esta expansión. También se ha descrito la presencia de biotoxinas en especies animales en las que anteriormente no estaban presentes por fenómenos asociados al cambio climático. Las biotoxinas pueden suponer grandes riesgos para la seguridad alimentaria, afectar a fuentes de riqueza como el turismo por su presencia en playas e incluso su utilización en el desarrollo de armas biológicas ya que la mayoría de ellas son fáciles de cultivar [62]. Sin embargo, este trabajo se centra en la seguridad natural desde la visión de la vertiente de la energía y sus interrelaciones, es decir, tanto los aspectos de la energía que pueden suponer un riesgo medioambiental como los aspectos medioambientales que pueden suponer un riesgo para la seguridad energética.

La seguridad energética se define de una forma general como la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asumible [63]. Sin embargo, estas definiciones de seguridad energética parece que son vistas por muchos autores como insuficientes [64], ya sea por la imprecisión de su alcance, la ausencia de consideración de las diferentes dimensiones o aspectos que intervienen en la seguridad energética. Sin embargo, establecer esta definición no es un asunto trivial ni sobre el que exista un consenso generalizado. Prueba de ello es la existencia de varios estudios focalizados casi exclusivamente en la comparativa de las definiciones del concepto de seguridad energética entre las numerosas publicaciones generadas en los últimos años.

La seguridad energética está contemplada también en conceptos más amplios, entre los que se incluyen la sostenibilidad energética. En este sentido, la definición que hace de este concepto el Consejo Mundial de la Energía está basada en tres dimensiones principales: la seguridad energética, la equidad energética y la sostenibilidad ambiental. El equilibrio de estos tres objetivos es lo que el Consejo Mundial de la Energía denomina *trilema* de la energía para el que ha establecido un índice que mide el desempeño de los países. Además de estas dimensiones básicas otros autores han identificado otras dimensiones que amplían la visión o que ayudan a caracterizar la seguridad energética: la disponibilidad de la energía, la infraestructura, los precios de la energía, los efectos en la

sociedad, los aspectos de sostenibilidad y ambientales, gobernanza y política, eficiencia energética [65], las fuentes del riesgo (ya sean tecnológicos, humanos o naturales), la duración de los impactos de las amenazas (es decir, impactos transitorios, sostenidos o permanentes), la propagación de los impactos (a nivel local, nacional o global), la singularidad de los impactos (únicos, infrecuentes, o más o menos frecuentes), la certeza de las amenazas (predecibles, probabilísticas, esperables pero difícilmente previsibles o de previsibilidad desconocida) y el alcance de la medición de los impactos, es decir cómo se va a medir la seguridad energética) [64].

2.2. DEFINICIONES Y CONCEPTO

2.2.1. La seguridad natural

En el ámbito de este trabajo la seguridad natural se define como los aspectos de seguridad relacionados con las interacciones entre las infraestructuras energéticas, el uso de la energía y la explotación de recursos minerales y energéticos y el medio ambiente y la sociedad.

Aunque los riesgos naturales para la seguridad son amplios y comprenden diferentes ámbitos de estudio [66], en este texto se entiende la seguridad natural desde la visión de la vertiente de la energía y sus interrelaciones, es decir, tanto los aspectos de la energía que pueden suponer un riesgo medioambiental como los aspectos medioambientales que pueden suponer un riesgo para la seguridad energética. En el primer caso las amenazas para la seguridad energética provienen de los impactos de la extracción de los recursos, de la producción, transporte y distribución de la energía y de su utilización, mientras que en el segundo caso se trataría de las amenazas medioambientales sobre el sistema energético y viceversa. En este sentido podríamos considerar desde aspectos más comunes como la afección de fenómenos meteorológicos adversos sobre sistemas energéticos hasta los efectos sobre estos de eventos mucho más extraordinarios como podrían ser las tormentas solares geomagnéticas [67]. Existen también casos de amenazas mutuas seguridad natural-seguridad energética. En este caso podemos citar la degradación del sector agroforestal [68] que en combinación con una inadecuada gestión de la biomasa en líneas eléctricas puede provocar la aparición de incendios forestales. Incluso ante una gestión de la biomasa adecuada, la degradación del sector forestal puede suponer agravar el alcance y los efectos de los incendios forestales, debido al crecimiento de vegetación combustible a varios niveles de altura por el mantenimiento inadecuado de la superficie forestal.

Uno de los mayores desafíos con el que nos encontramos en materia de seguridad natural son los efectos derivados del cambio climático. El incremento de la temperatura de la superficie de la Tierra en 0,9 °C desde finales del siglo XIX, un incremento de 0,2 °C desde 1969 en los primeros 700 m de superficie del mar, la pérdida de masa del hielo en las zonas polares, por pérdida de espesor y extensión, en las que no sólo la cantidad perdida es muy relevante sino que la tasa a la que lo pierde se ha triplicado en la última década a lo que hay que añadir la reducción de glaciares y masas de nieve en todo el planeta, el incremento de la tasa de aumento de nivel del mar que en los últimos 20 años ha duplicado a la del último siglo, el registro de un mayor número de eventos meteorológicos extremos y la acidificación de los océanos, que absorben más cantidad de CO₂ debido a una mayor presencia de este en la atmósfera son todas ellas evidencias de está teniendo lugar un rápido cambio climático [69]. En la actualidad el consenso científico sobre el origen antropogénico del cambio climático está en un rango de entre el 90% y el 100% [70] y es atribuido al efecto invernadero causado por los gases emitidos por la actividad humana que impiden reflejar la cantidad adecuada de la radiación solar

recibida por la Tierra. Cabe entonces preguntarse si la causa del calentamiento global puede ser debida al aumento de la radiación solar recibida. En sí misma no es una pregunta trivial en el sentido de que el planeta ha vivido con anterioridad varios ciclos de avance y retirada de los glaciares debido a pequeñas variaciones en la órbita terrestre (ciclos de Milankovitch). En este sentido, la cantidad de energía procedente del sol que se recibe en la capa exterior de la atmósfera se mide desde 1978 y no se observan mayores variaciones que las que tiene de manera cíclica cada 11 años [71]. Además, los modelos climáticos no obtienen los incrementos de temperatura que tienen lugar al incluir los cambios en la radiación solar y tampoco se observan calentamientos en las capas exteriores de la atmósfera tal y como cabría esperar con un aumento de la radiación solar [72]. Esto, unido a la rapidez con la que se están observando parecen descartar los cambios en la energía recibida del Sol como los causantes del cambio climático.

Los efectos adversos sobre el clima de las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular del dióxido de carbono, se advirtieron aunque solo como posibilidad en el conocido informe del Club de Roma “Los límites del crecimiento” realizado por un equipo del MIT, en el que curiosamente mostraba su esperanza en la energía nuclear como alternativa que detuviera las emisiones de CO₂ y por otro lado advertía de una contaminación térmica derivada del uso de la energía, que según las leyes de la termodinámica, se disipa en forma de calor y que podría llegar a tener graves efectos climáticos [73].

Como se indicaba anteriormente el cambio climático ha generado un aumento de los eventos meteorológicos extremos. En el año 2018 se han producido casi 1600 eventos catastróficos, la mayoría de ellos relacionados con la meteorología, que conllevaron el desplazamiento de 16,1 millones de afectados [74] (Figura 7). Evidentemente no todos estos fenómenos extremos son debidos al cambio climático, pero sin duda la fracción que corresponda a esta causa debe evitarse en el futuro.

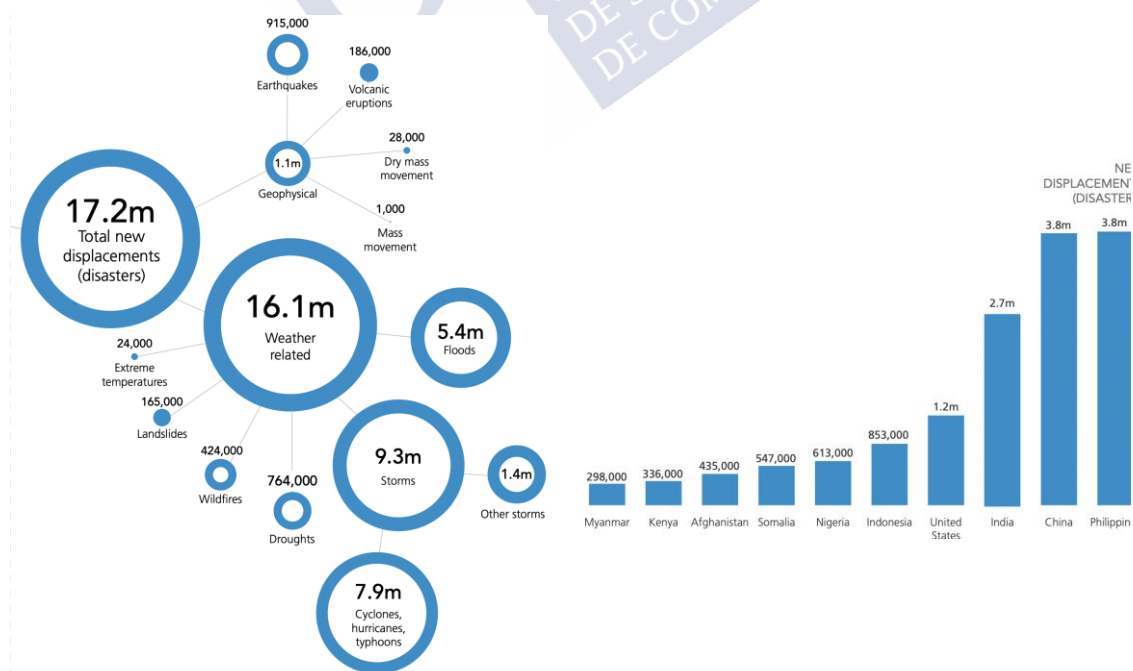
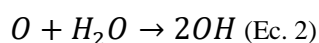
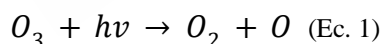


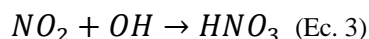
Figura 7: Desplazados por catástrofes naturales [74]

En la actualidad no hay información suficiente para determinar las posibles relaciones entre el cambio climático y la generación de conflictos, si es posible que se hayan agravado los efectos de estos conflictos por el empeoramiento de las condiciones de vida o la disponibilidad de recursos que tensionan las sociedades en donde este cambio provoca situaciones más extremas. Esto se ve agravado en el sentido en el que en los países en conflicto las autoridades tienen debilidades en la lucha contra los efectos de la degradación ambiental. El incremento de las temperaturas previsto puede agravar la escasez de agua o provocar crisis alimentarias por falta de cosechas. No es incluso descartable que el agravamiento del cambio climático pueda ser el germen de conflictos armados o actividad terrorista. Se estima que 971 millones de personas viven en zonas con altos riesgos climáticos y un 41% de ellos están en países con bajos niveles de paz [75]. En este sentido, los conflictos y los efectos del cambio climático se retroalimentan y la gestión de estos efectos y, llegado el caso, de las diferentes situaciones o niveles de conflicto es fundamental para la mitigación de los efectos.

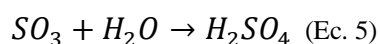
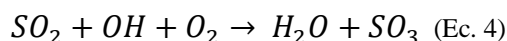
A pesar de que en los últimos años los efectos derivados del cambio climático acaparan prácticamente toda la atención de la sociedad, en realidad el aspecto más grave de la seguridad natural en estos momentos es la contaminación atmosférica, si bien es cierto que comparten amplios espacios de soluciones. Según las Naciones Unidas la contaminación del aire exterior e interior provoca la muerte prematura de 6,5 millones de personas de todo el mundo, y el 90% de la población está expuesto a niveles de contaminación superiores a los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud [14]. El peso de la energía en la contaminación del aire es importantísimo, siendo de lejos la actividad con mayor aportación (en algunos casos prácticamente la totalidad) de los principales contaminantes del aire: SO_2 , NO_x , $\text{PM}_{2,5}$ (materia particulada), CO , compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoníaco (NH_3). Pero es que además de estos contaminantes que podemos denominar primarios, generan a su vez contaminantes secundarios debido a transformaciones químicas, fundamentalmente lo que se conoce como lluvia ácida. Esta lluvia se forma por la oxidación de los óxidos contaminantes a través de radicales hidroxilo, que previamente se formaron por la descomposición fotoquímica del ozono, que libera un átomo de oxígeno que al combinarse con el agua genera dos hidroxilos [76]:



La reacción del OH con el NO_2 da lugar a ácido nítrico:



Mientras que la reacción con el SO_2 da lugar a una cadena de dos reacciones que finaliza con la formación del ácido sulfúrico.



Los ácidos formados no tienen necesariamente porqué quedarse en el lugar donde se producen. Las condiciones meteorológicas y la topografía del terreno son factores que van a determinar la dispersión o concentración de los contaminantes. La exposición a los contaminantes, tanto primarios como secundarios tiene efectos tanto en la salud humana como en los ecosistemas [14] e incluso en el patrimonio cultural, ya que los ácidos disuelven las rocas calcáreas como el mármol.

2.2.2. El capital natural

Una visión económica de la seguridad natural la encontramos en el concepto de capital natural en la medida en la que considera como activos económicos los recursos naturales. De esta forma, la OCDE definió el capital natural como los activos naturales en su función de proporcionar entradas de recursos naturales y servicios ambientales para la producción económica [77]. Más recientemente, esta definición puramente enmarcada en la producción económica se ha visto ampliada hasta un alcance más global en el sentido de considerarlo como el stock de recursos renovables y no renovables que se combinan para generar un flujo de beneficios para las personas [78], siendo estos beneficios el valor aportado a la sociedad por los servicios proporcionados por ecosistemas y recursos naturales, superando las restricciones de una visión exclusivamente economicista para considerar cualquier otro, como pueden ser beneficios culturales, sociales, etc. [79]. En un estudio realizado en 2013 por encargo de *The Economics of Ecosystems & Biodiversity (TEEB)* estimaba en 7,3 billones de dólares (US\$ 7.3 trillion) los costes de capital natural, entendiendo como tales aquellos aspectos por los que no se realizan pago (*externalities*), correspondientes a los sectores primarios de producción y procesado [80]. Para ello consideraba seis aspectos ambientales: el uso del suelo, el consumo de agua, las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire, la contaminación del suelo y del agua y los residuos. A partir de los datos correspondientes a estos aspectos se elaboró para cada uno de ellos una clasificación del binomio sector/región con mayores impactos, así como uno adicional a general que incluía a todos los aspectos (Tabla 1).

Tabla 1: Sectores/Regiones con mayores costes sobre el capital natural [80]

Aspecto	Sector/Región con mayores costes sobre el capital natural.
Uso del suelo	Cría de ganado/América del Sur
Consumo de Agua	Cultivo de trigo/Sur de Asia
Gases de efecto invernadero	Generación eléctrica de carbón/Asia Oriental
Contaminación del aire	Generación eléctrica de carbón/América del Norte
Contaminación del suelo y del agua	Cultivo de arroz/Asia Oriental
Residuos	Generación eléctrica nuclear/América del Norte
Global	Generación eléctrica de carbón/Asia Oriental

Otro estudio de 2014 valoraba el total de los servicios asociados a los ecosistemas mundiales en 124,8 billones de dólares al año (el doble del PIB mundial en ese momento) [81].

Actualmente todavía es relativamente difícil que las interacciones con el medio ambiente que tiene una empresa tengan una afección relevante a nivel económico, aunque sí que se puede apreciar una mayor relevancia de este aspecto a nivel de imagen pública que la empresa pueda rentabilizar como argumento de ventas o para justificar un mayor precio para sus productos. Otro aspecto que puede ser muy relevante a nivel económico para las empresas en el ámbito ambiental son las consecuencias derivadas de accidentes o eventos que causen problemas ambientales. Pero la realidad es que más allá de estos dos aspectos las cuestiones económicas relacionadas con las interacciones de las

empresas con el medio ambiente no suelen reflejarse ni la toma de decisiones empresariales viene determinada por ellas. Para incorporar el capital natural a la toma de decisiones empresariales se ha diseñado herramientas que ayuden a identificar y valorar los impactos y las dependencias del capital natural. Este es el caso del Protocolo de Capital Natural diseñado por la Coalición para el Capital Natural [82]. Este protocolo está basado en principios de relevancia de los aspectos más importantes, rigor en los métodos de tratamiento de la información y los datos, con capacidad de reproducir las acciones y consistencia en el sentido en el que los datos y metodologías de evaluación son compatibles y está dividido en cuatro fases. La primera es el marco en el que se evalúan las razones para considerar el capital natural como un aspecto importante para la organización, la segunda es en la que se determina el alcance identificando los impactos (positivos o negativos) y dependencias más relevantes del capital natural, la tercera es la fase de medición y valoración de los impactos y una cuarta de puesta en marcha en la que una vez recopilados y validados los resultados de las fases anteriores, se identifican las fortalezas y debilidades, se actúa sobre los resultados obtenidos y se incorpora la evaluación del capital natural a la toma de decisiones empresariales [83]. En cualquier caso, la aplicación de procedimientos de este tipo es solo un paso para la integración del capital natural en la gestión empresarial. A partir de este punto se dispondrá de información y conocimiento para la toma de decisiones, la definición de estrategias y la divulgación hacia el exterior de la organización de los aspectos relacionados con el capital natural relevantes para la organización [82].

2.2.3. La seguridad energética

Se indicaba antes que la Agencia Internacional de la Energía define la seguridad energética como “la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asumible” [63]. Por otro lado, el Consejo Mundial de la Energía define la seguridad energética como la gestión efectiva del suministro de energía primaria de fuentes propias y externas, la fiabilidad de la infraestructura energética y la capacidad de los proveedores energéticos de cubrir la demanda presente y futura [84]. Esta definición incluye la de la Agencia Internacional de la Energía si asumimos como “gestión efectiva” supone obtener la energía a un precio asumible. A partir de esta definición básica existen múltiples publicaciones que van incorporando e integrando diferentes conceptos como la disponibilidad y la diversidad energética, la infraestructura, los precios de la energía, los efectos sociales, el medio ambiente, la política y la eficiencia energética. Es, por ejemplo, el caso del Consejo Mundial de la Energía, en donde la seguridad energética aparece dentro de un concepto más amplio que denomina “*trilema* de la energía” en los que incluye dos conceptos adicionales: la equidad energética y la sostenibilidad ambiental de los sistemas energéticos. En este sentido define la equidad energética como la capacidad que tiene un país para proporcionar acceso universal de forma asequible, con precios justos y de forma abundante para usos domésticos y comerciales [84], mientras que la sostenibilidad representa la transición hacia modelos energéticos acordes con los desafíos ambientales y climáticos. Además del *trilema* de la energía existen otros marcos que amplían la mera disponibilidad y asequibilidad de la energía. Es el caso del modelo propuesto por el Centro de Investigación de la Energía del Asia-Pacífico conocido como las 4 A (*the four A's*) debido a que su concepto de seguridad energética incluye la disponibilidad de la energía (*availability*), el acceso a los recursos energéticos (*accessibility*), la aceptabilidad en términos sostenibles de la energía (*acceptability*) y la asequibilidad de la energía (*affordability*) [85].

2.3. LAS VISIONES DE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA Y LA SOSTENIBILIDAD

2.3.1. La visión de la comunidad internacional

Como marco general la visión de la comunidad internacional de la seguridad energética incluyendo además el concepto de sostenibilidad se encuentra fundamentalmente en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [86]. Este documento consiste en 17 objetivos entre los cuales el número 7 consiste en “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”. En la definición de este objetivo podemos encontrar la definición básica de seguridad energética. En cualquier caso, aunque la energía dispone de un objetivo definido concreto, su consecución es necesaria para el cumplimiento de la práctica totalidad de los otros objetivos ya que sin disponibilidad energética su cumplimiento no sería posible. La preocupación de las Naciones Unidas por la seguridad y sostenibilidad energética se justifica porque, según sus datos, el 13% de la población mundial no tiene acceso a la electricidad, cerca del 40% de la población mundial dependen de combustibles como la madera y el carbón para cocinar y la contaminación que genera en espacios cerrados provocó 4,3 millones de muertes en 2012 y, en general, los problemas ambientales son responsables del 25% de las muertes anuales, sin contar con el resto de problemas de salud y destrucción de ecosistemas. En este sentido la ONU calcula que 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero proceden de la energía [87].

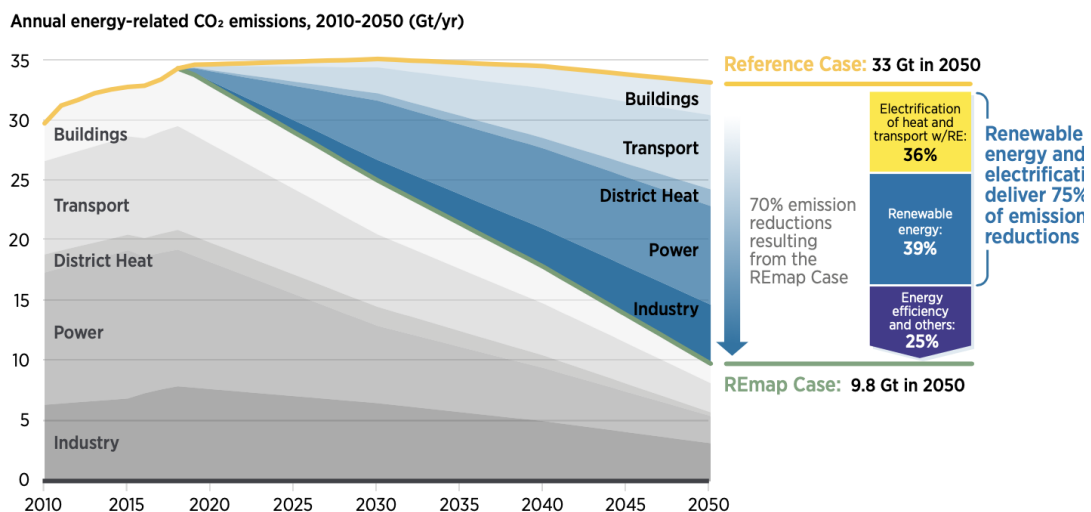
En lo que se refiere a la seguridad energética, según este documento en el período que transcurre desde su publicación hasta el año 2030 se debería alcanzar la universalidad del acceso a una energía en los términos en los que esta se ha definido: asequibilidad y fiabilidad. Entendiendo como acceso universal una implantación del 100% estaríamos ante una medida cuantificable. Otra de las medidas cuantificables que componen este objetivo sería la de duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética. Sin embargo, la medida que forma parte el objetivo 7 relativa a las energías renovables no está cuantificada y se limita a requerir “aumentar considerablemente” su proporción en los sistemas energéticos. Otro de los objetivos estrechamente relacionado es el número 13: “adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” debido a la gran proporción de emisiones de gases de efecto invernadero relacionada con la energía.

Además de las medidas más o menos generales establecidas en la Agenda 2030, el marco de referencia en energía y clima se completa con el Acuerdo de París (acuerdo de la XXI Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21)) que pretende limitar el incremento de la temperatura media global a 2 °C respecto a niveles preindustriales y recomendando su limitación a 1,5 °C.

Más allá del medio plazo, de cara a 2050 los esfuerzos para la transformación energética global se encuadrarían en aspectos como una mayor electrificación basada en energías renovables y el uso de estas más allá de la generación eléctrica, la disminución en la demanda de combustibles fósiles y en las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido la Agencia Internacional de Energías Renovables propone una hoja de ruta en la que cabe destacar un aumento de la proporción de la electricidad sobre el consumo de energía total desde un 20% actual a un 49% en 2050. Estos incrementos se alcanzarían mediante uso de la movilidad eléctrica (pasando de los 6 millones de vehículos de pasajeros que se estima que hay actualmente a 1.166 millones en 2050 a través de reducciones en su precio y el desarrollo de infraestructura para la recarga), la promoción de las bombas de calor para la climatización y la producción de hidrógeno mediante

electricidad renovable que pueda ser utilizado como combustible en medios de transporte pesado y gran escala. La aportación renovable se conseguiría aumentando la aportación de la energía solar fotovoltaica y eólica, pasando de los 109 GW/año a 360 GW/año en el caso de la energía solar fotovoltaica y pasando de los 54 GW/año a 240 GW/año en el caso de la eólica. Para el caso del resto de renovables se propone el uso de energía solar térmica para la calefacción en edificios para los que no sea viable el uso de la bomba de calor, pasando de los 675 millones de metros cuadrados de colectores solares térmicos instalados en la actualidad a 5.800 en 2050. En lo que respecta a los biocombustibles para transporte pesado y a gran escala propone pasar de los 130 mil millones de litros al año actuales a 650 mil millones en 2050. Estas medidas deberían reducir la demanda de combustibles fósiles de un 64% respecto al consumo actual, pasando de 95 millones de barriles de petróleo diarios a 22 en 2050, de los 3.752 mil millones de metros cúbicos de gas actuales a 2.250 mil millones de metros cúbicos de gas natural en 2050 y de las 5.535 Mt de carbón actuales a 713 Mt en ese año. Con todo ello se conseguiría una reducción de un 71% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía pasando de unas emisiones per cápita de las 4,6 t actuales a 1,1 en 2050 [88] (Figura 8). Esta hoja de ruta pone cifras y objetivos a las 20 recomendaciones sobre política de energías renovables realizadas por la Agencia Internacional de la Energía de una forma más genérica tanto en aspectos generales y transversales dentro del sector energético como específicos sobre la electricidad, la climatización y el transporte renovable [89].

De acuerdo con el IPCC las actividades humanas han causado un incremento de 1°C en la temperatura sobre los niveles preindustriales y con la tasa de crecimiento actual se espera que se alcance un incremento de 1,5°C respecto a niveles preindustriales entre 2030 y 2052 [90] (Figura 9) y recalca que, aunque los efectos del incremento de 1,5° son mayores a los que se aprecian en la actualidad, son mucho más asumibles que los derivados del incremento de 2°C que pone como límite máximo el Acuerdo de París, por lo que la intensificación en la adopción de políticas de reducción de emisiones se hace muy necesaria.



© IRENA 2019

Figura 8: Diferentes escenarios de emisiones de CO₂ y escenario de la hoja de ruta propuesta por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) [88]

2.3.2. La visión de la Unión Europea

La visión actual de la Unión Europea de la seguridad energética ha estado muy condicionada por los acontecimientos que tuvieron lugar durante los inviernos de 2006 y 2009 [91]. El 1 enero de 2006 la compañía rusa Gazprom interrumpe el suministro de gas a Ucrania después de meses de desacuerdo debido al precio del gas. Gazprom pretendía una subida de los precios de un 460% (pasar de 50\$/1000 m³ a 230\$/1000 m³). Finalmente se reanuda el suministro después de un acuerdo que, aunque formalmente fijaba el precio en lo pretendido inicialmente por Gazprom, en realidad se establecía un precio de 95 \$/1000 m³ al mezclar el gas ruso con el procedente de Asia Central a través de gasoductos que transcurren por territorio ruso, estableciéndose así una subida del 190%, reanudándose el suministro a partir del 4 de enero. Después de que durante los años 2007 y 2008 se produjeran tensiones y nuevas amenazas de interrupción de suministro debido a la deuda de la compañía ucraniana Naftogas con Gazprom en enero de 2009 se producen nuevas incidencias en el suministro de gas a Ucrania en forma de interrupciones y reducciones en el suministro, de manera que este no queda totalmente normalizado hasta el 20 de enero [92]. El problema de la Unión Europea en el conflicto entre Rusia y Ucrania es que la mayor parte del gas natural que llega a algunos miembros de la Unión lo hace a través de Ucrania.

A pesar de la intención de la Unión Europea de reducir su dependencia de Rusia, la realidad es que siguen en construcción nuevas infraestructuras que incrementarán la capacidad exportadora de Rusia. El gasoducto North Stream 2, que duplicará la capacidad del actual gasoducto que une Rusia y Alemania ha supuesto incluso un desacuerdo entre Alemania y la Unión Europea y entre Alemania y países miembros de la UE [93], [94] por motivos de estrategia energética y también por las pérdidas económicas que tendrán algunos países por los derechos de paso del gas por su territorio con los gasoductos actuales y entre Alemania y Estados Unidos [95] por motivos más asociados a la política. Hasta ahora la dependencia Rusia-UE es, hasta cierto punto, mutua ya que Rusia exportó el 71% de su gas natural a Europa. En este sentido, Rusia busca mercados alternativos, entre ellos el gasoducto Power of Sibeira para el suministro a China y el gasoducto TurkStream, entre Rusia y Turquía que además podría suministrar gas al sureste de Europa. Esta búsqueda de mercados alternativos por parte de Rusia puede afectar en el futuro a los precios demandados por Rusia por el gas, al generarse una competencia entre clientes.

Por su parte, la Unión Europea intenta diversificar su suministro de gas mediante, por un lado, el mercado de gas natural licuado, introducido en el sistema mediante regasificadoras y por otro apoyando el proyecto Corredor del Gas del Sur que suministraría gas procedente del Caspio, Oriente Medio y el Mediterráneo oriental (Figura 10).

El Corredor Meridional del Gas agrupa a tres gasoductos: la construcción de los gasoductos Trans-Adriático (TAP), que termina en Italia después de atravesar Grecia y Albania, y el Trans-Anatoliano (TANAP) se une al anterior después de atravesar Turquía y que a su vez se une al existente gasoducto del sur del Cáucaso (SCP) que será ampliado con una tubería paralela a través de Azerbaiyán y Georgia.

La gestión de la Unión Europea de la seguridad energética no puede aislarse de otras políticas y objetivos en los que el uso de la energía es una parte fundamental, en particular en materia climática, a través de una estructura normativa compleja que además ha ido adaptándose a las diferentes necesidades con el transcurso del tiempo [96], e industrial, de forma que por un lado se integra con las directrices del marco de la energía y el clima para el período 2020-2030 (COM(2014) 15) y por otro con la política industrial (COM(2014) 14) (Figura 12).

a) Cambio en la temperatura global observada y respuestas de los modelos a las trayectorias estilizadas de las emisiones antropógenas y del forzamiento

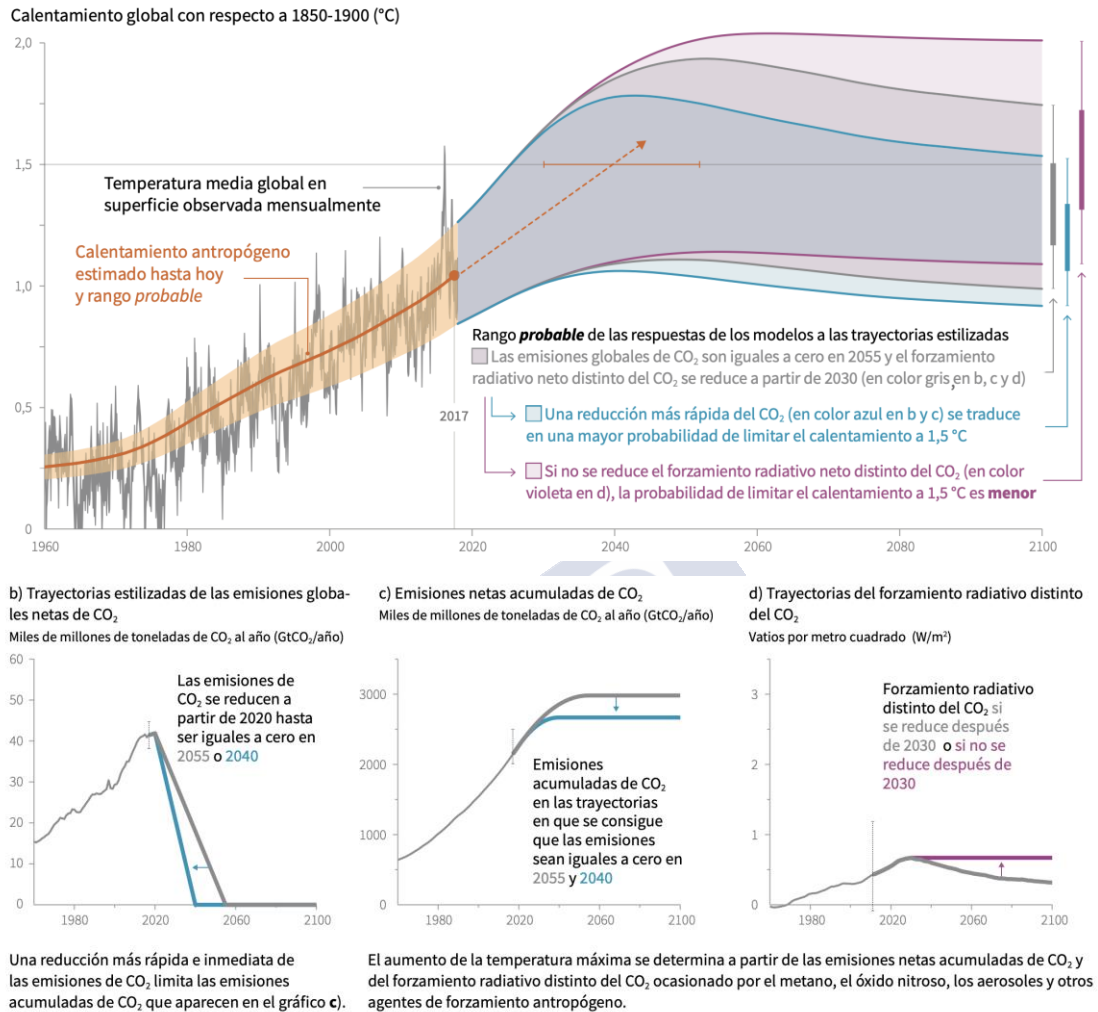


Figura a: Cambio en la temperatura media superficial global observada y calentamiento global antropogénico estimado. Línea naranja hasta 2017 con margen sombreado en naranja más claro. La línea de puntos naranja y la línea horizontal naranja muestran respectivamente la estimación central y el rango probable de tiempo en el que se alcanza el aumento de 1,5°C si continúa el ritmo actual de calentamiento. El área gris en la derecha de la imagen muestra el rango probable de respuestas de calentamiento, calculadas con un modelo climático simple, a un escenario en el cual las emisiones netas de CO₂ (línea gris en las figuras b y c) caen en forma de una línea recta de 2020 para alcanzar el valor neto cero en 2055 y forzamiento radiativo neto no CO₂ (línea gris en la figura d) aumenta hasta 2030 para caer a continuación.

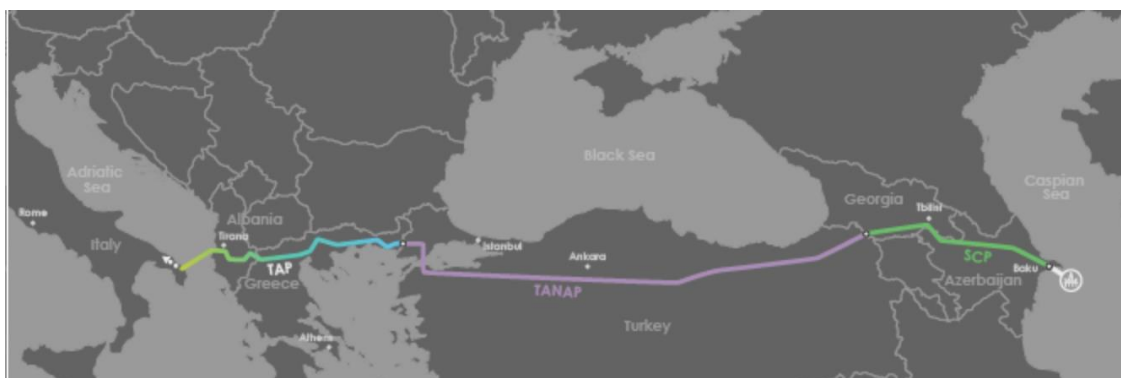
La zona azul en la figura a muestra la respuesta a reducciones más rápidas en las emisiones de CO₂ (línea azul en la figura b), alcanzando el valor neto cero en 2040, reduciendo las emisiones acumuladas de CO₂ (figura c). La zona púrpura muestra la respuesta a las emisiones netas de CO₂ reduciéndose a cero en 2055, con forzamiento neto no CO₂ permaneciendo constante después de 2030.

La barra de error vertical a la derecha de la figura a muestra el rango probable (líneas finas) y los terciles centrales (33° a 66° percentiles, líneas gruesas) de la distribución estimada del calentamiento en 2100 bajo esos tres escenarios.

Las barras de error verticales de puntos en las figuras b, c y d muestran el rango probable de histórico anual y acumulado de emisiones globales netas de CO₂ en 2017 y de forzamiento radiativo no CO₂ en 2011 respectivamente.

Fuente: IPCC

Figura 9: Cambios observados en la temperatura y previsiones para diferentes escenarios IPCC Adaptado (texto) de [90]



© Trans Adriatic Pipeline AG, all rights reserved

Figura 10: Corredor Meridional del Gas [97]

Tabla 2: Cifras relacionadas con la seguridad energética en la UE [91], [98], [99]

	2013	2019
% Energía consumida que es importada	53%	55%
Importaciones de crudo	90%	87%
Importaciones de gas natural	66%	70%
Importaciones combustibles sólidos	42%	40%
Importaciones combustible nuclear	40%	40%
% importaciones energía sobre importaciones totales	20%	15%
Número de estados miembros que dependen de un único proveedor para el suministro de gas.	6	
% Reducción de importaciones de gas por cada incremento porcentual en ahorro energético.	2,6%	
% Parque de viviendas energéticamente ineficientes.	75%	
% Transporte que depende de productos derivados del petróleo.	94%	
Relación precios electricidad con EE. UU.	+30%	
Relación precios gas con EE. UU.	+100%	

La Estrategia Europea de Seguridad Energética [91] (Figura 11) comienza con los aspectos básicos relativos a la protección de las infraestructuras, no solo a nivel físico sino a nivel informático, así como a las precauciones a adoptar ante la toma de control de empresas propietarias de infraestructuras por parte de terceros países. También incide en la necesidad de la disposición de reservas de petróleo. El nivel mínimo de reservas que los Estados miembros deben mantener está fijado por la Directiva 2009/119/CE que los fija en 90 días de importaciones netas diarias o 61 días de consumo interno medio diario.

A partir de los aspectos básicos de seguridad se establecen medidas que se podrían denominar de gestión o de coordinación. Por un lado, la necesidad de crear un mercado interior e integrado de la energía y por otro lado la necesidad de coordinar las diferentes políticas energéticas nacionales y una política energética común de cara al exterior.

El resto de los pilares en los que se basa la Estrategia se enmarcan en la lucha contra la dependencia energética. El impacto es tan relevante que el 55% de la energía consumida es importada, y los niveles de importación son muy elevados (en el caso del crudo un 87% y en el del gas natural de un 70% [99], bajando al 40% en el caso de los combustibles sólidos y nucleares). La primera medida para disminuir la dependencia es la

reducción de la demanda energética con la aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética a corto y largo plazo (incremento de la eficiencia energética en un 20% en 2020 y de un 27% en 2030). En la Comunicación de la Comisión Europea COM(2016) 860 “Energía limpia para todos los europeos” se insiste en la necesidad de la mejora en la eficiencia energética en aspectos tales como el ahorro energético por parte de los suministradores y distribuidores de energía (1,5% anual, proponiendo la prórroga de esta obligación más allá de 2020), el diseño ecológico y el etiquetado energético y sobre todo la eficiencia energética en la edificación. En este sentido, la importancia de la eficiencia energética en las edificaciones es enorme. El 40% de la energía final consumida en la Unión Europea tiene lugar en calefacción/refrigeración en edificios [100] y suponen el 36% de las emisiones de CO₂.

Otra de las medidas para la reducción de la dependencia energética es el aumento de la producción interior de energía. La Estrategia no plantea en ningún caso el abandono de ninguna fuente de energía primaria ni de ninguna tecnología limitándose a la necesidad de cumplir los requisitos medioambientales en las explotaciones de petróleo y gas, así como al establecimiento de medidas de mitigación de emisiones de dióxido de carbono en forma de captura y almacenamiento. Incluso se aborda la posibilidad de la explotación del gas de esquisto para el que, además de las reservas de tipo medioambiental ya citadas para el petróleo y el gas, establece la necesidad de una opinión pública favorable. En lo que respecta a las fuentes renovables se recuerdan los objetivos a corto y medio plazo (consumo total de energía procedente de fuentes renovables del 20% para 2020 y 27% para 2030) y no prevé ningún avance adicional respecto a estos objetivos y enmarca el despliegue de las fuentes renovables en un planteamiento basado en el mercado.

Una tercera medida relacionada con la dependencia energética es la diversificación del abastecimiento (fuentes e infraestructuras). Ya se ha citado anteriormente el caso de Rusia y su gas como un ejemplo de los problemas de la dependencia de un número limitado de proveedores. El caso de Rusia no se limita solo al gas, sino también al petróleo y al combustible nuclear.

Muchas de las políticas y objetivos fijados en la Estrategia de Seguridad Energética de Unión Europea y de los diferentes textos y normativas derivados o creados a partir de ella han venido siendo actualizados, tanto por revisiones propias como por la adhesión de la Unión Europea y sus países miembros a otros tratados internacionales, en particular el acuerdo de París (acuerdo de la XXI Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21)), en general en forma de refuerzo y el establecimiento de objetivos más ambiciosos. El Acuerdo de París pretende limitar el incremento de la temperatura media global a 2 °C respecto a niveles preindustriales de forma que si este incremento se limita a 1,5 °C los riesgos derivados de los impactos del cambio climático se verían considerablemente reducidos. Esta acotación del aumento de la temperatura solo será factible con la reducción de gases de efecto invernadero. En realidad, el Acuerdo ni siquiera contempla una reducción inmediata, sino que prevé que se alcance el máximo nivel de emisiones lo antes posible. De hecho, el Acuerdo admite que, en el caso de los países en desarrollo el período de tiempo necesario para alcanzar el pico de emisiones será más largo, para a continuación aplicar medidas de reducción a medio y largo plazo de forma que durante la segunda mitad del siglo se alcance la neutralidad equilibrando las emisiones y las absorciones de gases de efecto invernadero [101] [102] [103]. Estas actualizaciones han quedado plasmadas en el Marco Legislativo 2030 “Energía limpia para todos los europeos” (paquete de invierno) de 2018 [104], consistente en un paquete de 8 textos normativos formado por la siguiente legislación:

- Directiva de eficiencia energética en edificios (Directiva (UE) 2018/844).
- Directiva de fomento de uso de energía procedente de fuentes renovables (Directiva (UE) 2018/2001).
- Directiva de eficiencia energética (Directiva (UE) 2018/2002).
- Reglamento sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima (Reglamento (UE) 2018/1999).
- Reglamento sobre la preparación frente a los riesgos en el sector de la electricidad (Reglamento (UE) 2019/941).
- Reglamento por el que se crea la Agencia de la Unión Europea para la Cooperación de los Reguladores de la Energía (Reglamento (UE) 2019/942).
- Reglamento relativo al mercado interior de la electricidad (Reglamento (UE) 2019/943).
- Directiva sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad (Directiva (UE) 2019/944).





Figura 11: Estrategia de Seguridad Energética de la Unión Europea 2014 (elaboración propia)

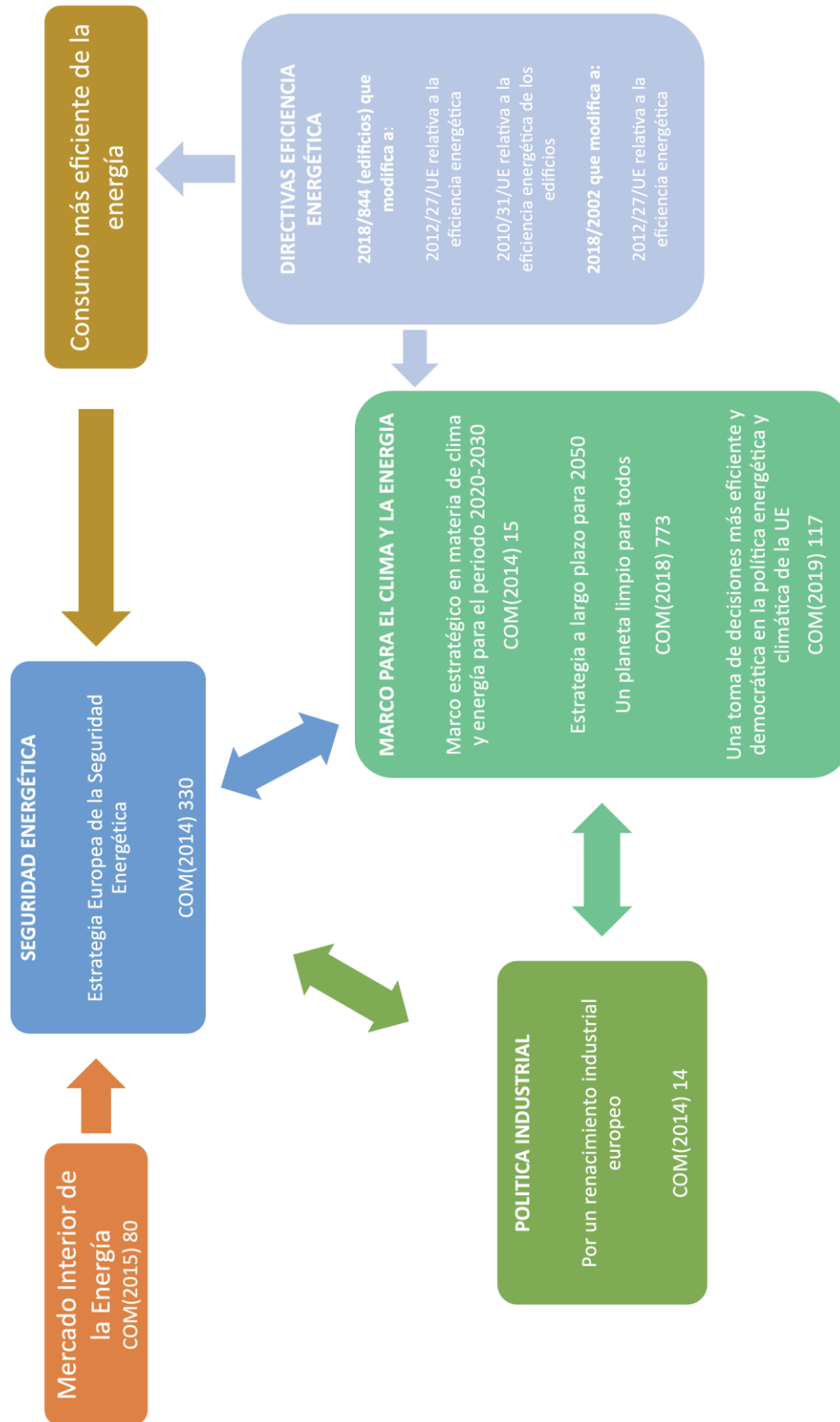


Figura 12: Integración de la Estrategia de Seguridad con los marcos climático, energético e industrial (elaboración propia)

Con este paquete legislativo los nuevos objetivos de la Unión Europea para 2030 en materia de energía y clima son los indicados en la Tabla 3.

Tabla 3: Objetivos de la Unión Europea para 2030

Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	40 %
Consumo de energía procedente de fuentes renovables	32 %
Objetivo de eficiencia energética	32,5 %

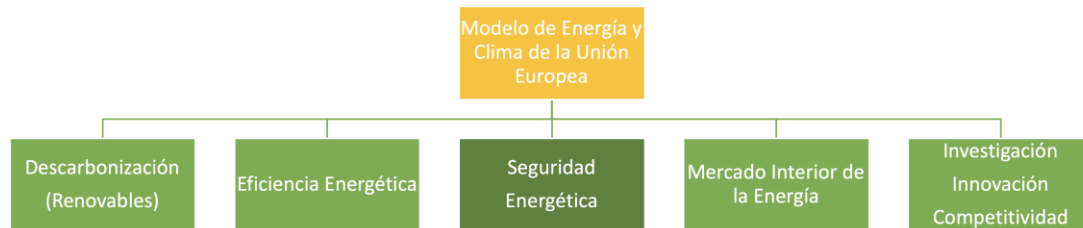


Figura 13: Modelo de Energía y Clima de la Unión Europea (elaboración propia)

Este conjunto de legislación pretende servir de marco hacia la transición energética que permita alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Sin embargo, su desarrollo puede tener efectos indeseados, sobre todo en sociedades dependientes de formas de energía primaria cuyo uso se pretende reducir, en particular regiones dependientes del carbón, situaciones de singulares debido a insularidad y aspectos relacionados con la pobreza energética [105].

La forma en la que el paquete de invierno de 2018 enfoca la seguridad energética se basa fundamentalmente en la reducción del consumo a través de la eficiencia energética, en la producción de más energía y en la mejora de las conexiones transfronterizas dentro de la Unión. Difiere, por tanto, de la Estrategia Europea de Seguridad Energética de 2014 en la forma en la que se produce el aumento de la producción interior de energía y la diversificación de las fuentes ya que, mientras que en la estrategia de 2014 no se renunciaba a ninguna fuente de energía, en el paquete de invierno de 2018 hay un enfoque claro hacia las fuentes renovables. Otro de los aspectos en los que el paquete de invierno se diferencia de la estrategia de 2014 es en pasos adicionales en los mecanismos de solidaridad e interconexión. De la estrategia de 2014 surgió la necesidad de la Unión de la Energía. En el caso del paquete legislativo de 2018 se dan pasos como la flexibilización de mercados interiores, creación de agencias de coordinación y la potenciación de los proyectos de interconexión incluyéndolos como Proyectos de Interés Común que, por tanto, son susceptibles de recibir financiación de la Unión Europea (Figura 14). Por último, también es destacable que en la estrategia de 2014 se ponía el foco sobre todo en las cuestiones relacionadas con el gas natural. Esto ya no es así en el paquete de invierno y se puede apreciar un enfoque mucho mayor hacia la electricidad.

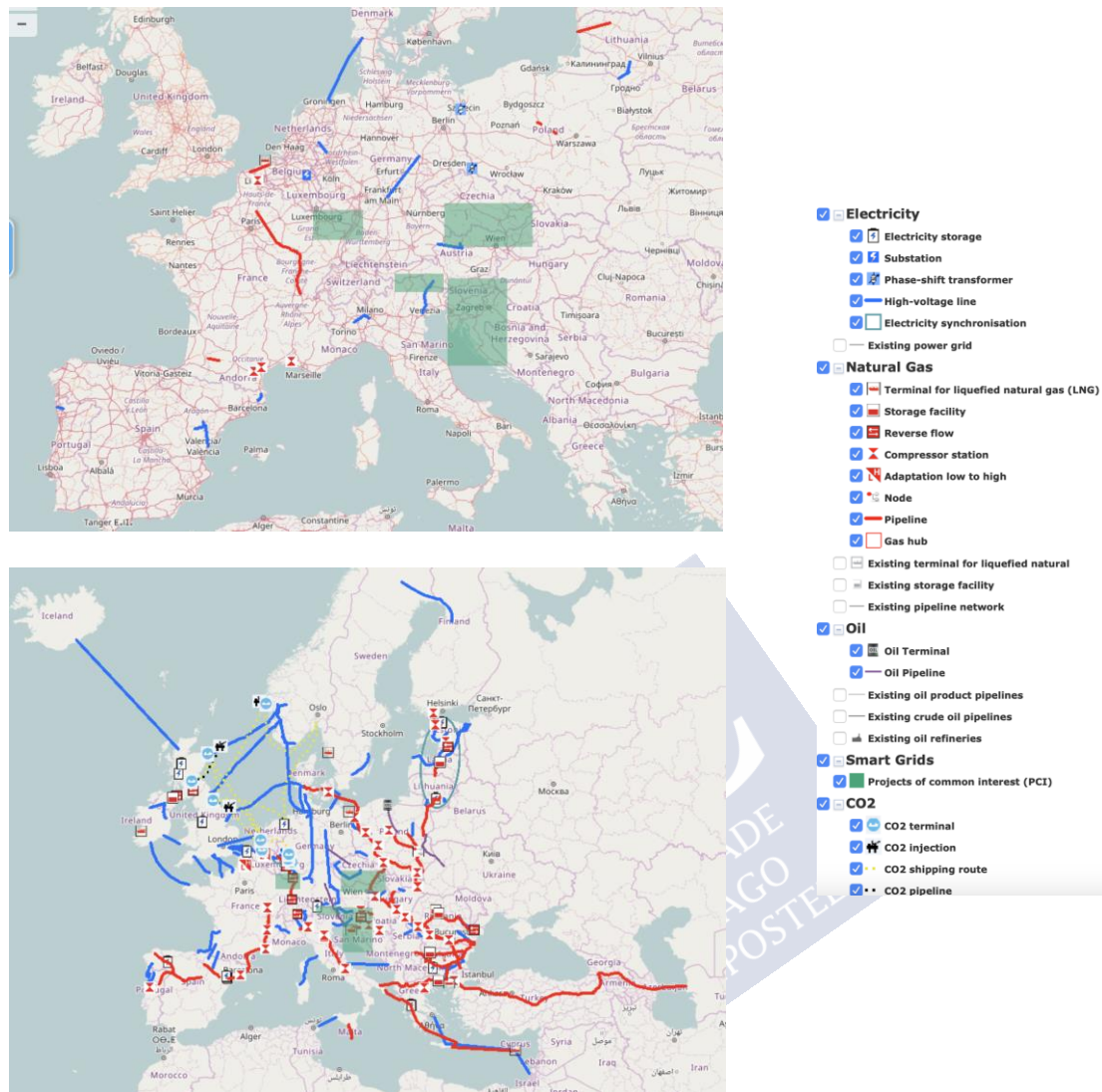


Figura 14: Proyectos de Interés Común de la Unión Europea: Mapa superior completados, mapa inferior en marcha
Realizados a partir de la herramienta “Projects of common interest - Interactive map” [106]

Por último, la visión a largo plazo, de cara a 2050 está reflejada en la Comunicación COM(2018) 773: Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra. Este documento, que no cambia los objetivos para 2030 y que según se indica en el mismo trata de establecer la dirección que debe tomar la Unión Europea para una transición hacia una economía de cero emisiones netas, donde la energía tiene un papel fundamental al ser la que aporta el 75% de las emisiones. La estrategia consiste en siete componentes: 1. Profundizar en la eficiencia energética, 2. Maximizar el despliegue de las energías renovables y la electrificación de la sociedad, 3. Actuaciones sobre la movilidad más allá de la electrificación sobre todo para los medios de transporte pesado, 4. Industria eficiente y competitiva y economía circular, 5. Infraestructuras inteligentes e interconectadas, 6. Bioeconomía y 7. Captura y almacenamiento de carbono [107].

2.3.3. La visión de España

La visión de España de la seguridad energética se puede encuadrar en dos entornos fundamentales: la estrategia de energía y clima y la Estrategia de Seguridad Nacional y su particularización a través de la Estrategia de Seguridad Energética Nacional.

A nivel del Estado, se ha definido el Marco Estratégico de Energía y Clima [108] formado por tres documentos: Anteproyecto de Ley de Cambio Climático [109], el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [110] y la Estrategia de Transición Justa [111], todo ello con el objetivo de armonizar el marco español con la visión de la Comisión Europea, el Acuerdo de París y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.

El anteproyecto de Ley de Cambio Climático tiene como objetivo el cumplimiento del Acuerdo de París de 2015 y facilitar la descarbonización de la economía (Tabla 4).

Tabla 4: Objetivos del anteproyecto de Ley de Cambio Climático [109]

	2030	2050
Reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990	20%	90%
Consumo total de energía procedente de energías renovables	35%	
Generación eléctrica a partir de energías con origen renovable	70%	100%
Incremento de la eficiencia energética (disminución del consumo de energía primaria)	35%	

Por su parte, el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 establece objetivos más ambiciosos que el borrador de la Ley de Cambio Climático (Tabla 5).

Tabla 5: Objetivos del borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [110]

	2030	2050
Reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990	21%	90%
Consumo total de energía procedente de energías renovables	42%	
Generación eléctrica a partir de energías con origen renovable	74%	100%
Incremento de la eficiencia energética (disminución del consumo de energía primaria)	39,6%	

Para la consecución de estos objetivos el PNIEC prevé actuaciones e inversiones en energías renovables, en las que destacan sobre todo la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. No obstante, los incrementos previstos para cada tecnología podrán variar en función de los costes y eficiencias que se obtengan durante el período para cada tecnología (Tabla 6).

Tabla 6: Incrementos en la potencia instalada eólica y solar fotovoltaica previstos en el PNIEC [110]

Fuente	Potencia Instalada Dic. 2018 [112] (MW)	Potencia Instalada Prevista 2030 [110] (MW)	Incremento (%)
Eólica	23.507	50.258	213,80%
Solar fotovoltaica	4.714	36.882	782,39%

En lo que respecta a la eficiencia energética, se prevén actuaciones en el transporte, en las edificaciones y en los electrodomésticos. Para el transporte se proponen limitaciones al tráfico de los vehículos más contaminantes a partir del año 2023 en las

ciudades de más de 50.000 habitantes y ayudas para la renovación de los vehículos tanto para otros menos contaminantes como eléctricos. Estos últimos destacan en el Plan al prever que supondrán el 16% de los vehículos en 2030, lo que supone la incorporación de cinco millones de vehículos, para posteriormente alcanzar un parque de cero emisiones en 2050. Se estima que la inversión total para los objetivos de 2030 del vehículo eléctrico es de 132.403 millones de euros y prevé ayudas públicas en el período 2021-2025 de 1.000 millones de euros. Para las edificaciones, el PNIEC prevé ayudas a la rehabilitación, sobre todo para el aislamiento térmico en 1.200.000 viviendas hasta 2030 y mejorar las instalaciones térmicas de manera que se reduzcan las pérdidas energéticas en 300.000 viviendas al año hasta 2030 [113].

Este plan prevé unas inversiones de 236.124 M€ entre 2021 y 2030 (Figura 15) siendo más de 195.000 M€ inversión adicional respecto al que correspondería si se siguiese la tendencia de la situación actual. La inversión privada supondría un 80% y el 20% sería inversión pública y se conseguirían 364.000 empleos adicionales en 2030. El borrador del Plan espera unos ahorros acumulados entre 2021 y 2030 en importaciones de combustibles fósiles de más de 75.000 M€.

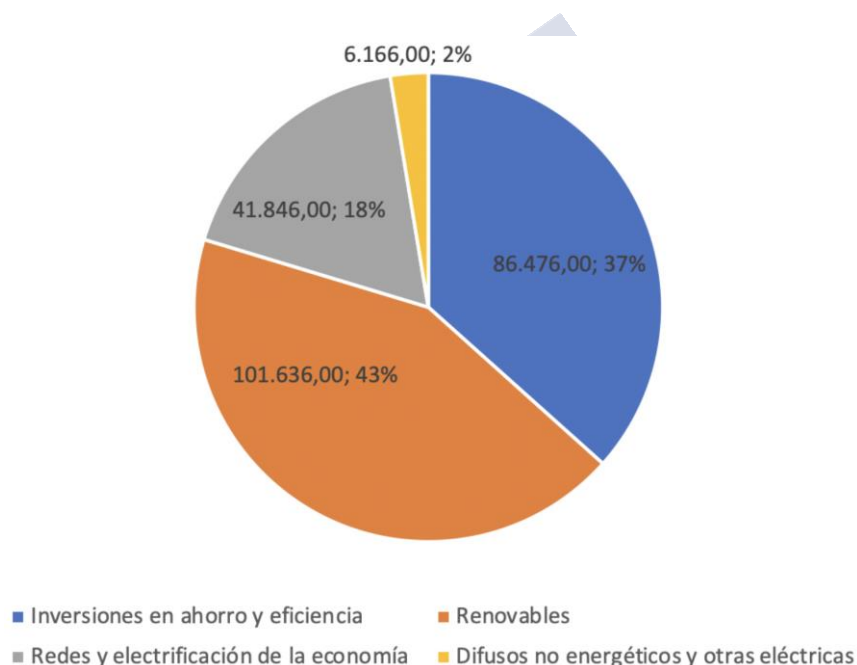
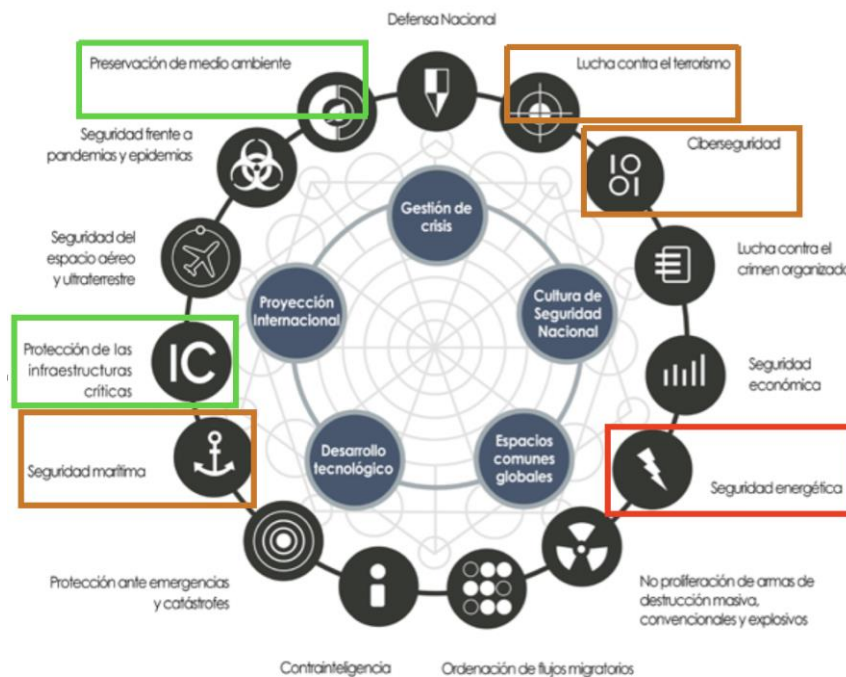


Figura 15: Inversiones previstas en el borrador del Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), en millones de euros
Elaboración propia a partir de [110]

Por último, la Estrategia de Transición Justa pretende maximizar los beneficios de la transición ecológica y minimizar sus posibles perjuicios, sobre todo en materia de empleo y posibles efectos territoriales estableciendo medidas contra la despoblación.

El otro pilar de la visión española del conjunto formado por la seguridad energética, la seguridad ambiental y la sostenibilidad es la Estrategia de Seguridad Nacional elaborada por el Departamento de Seguridad Nacional dependiente de la Presidencia del Gobierno (Figura 16). Este documento reconoce como desafíos para la seguridad nacional aspectos como la vulnerabilidad energética y los efectos derivados del cambio climático. Desde su punto de vista, la seguridad energética tiene como objetivo la diversificación de las fuentes de energía, garantizar la seguridad del transporte y abastecimiento e impulsar la sostenibilidad energética [2] a través de líneas de acción entre las que están el aseguramiento del abastecimiento de los recursos energéticos, la seguridad de las

infraestructuras energéticas, en particular aquellas consideradas como críticas frente a situaciones que puedan comprometerlas como catástrofes naturales, accidentes, amenazas cibernéticas, sabotajes y terrorismo.



OBJETIVOS GENERALES Y ÁMBITOS DE LA SEGURIDAD NACIONAL

AMENAZAS Y DESAFÍOS PARA LA SEGURIDAD NACIONAL



Figura 16: La seguridad energética, ambiental y la sostenibilidad en la Estrategia de Seguridad Nacional

Modificado por el autor de [2]

Además de vincular la seguridad energética con la sostenibilidad, la Estrategia de Seguridad Nacional trata de forma particular la preservación del medio ambiente con el objetivo, entre otros de la lucha contra el cambio climático.

En 2015 España elaboró su Estrategia de Seguridad Energética Nacional, anterior por tanto a la Estrategia de Seguridad Nacional de 2017, por lo que desarrolla y actualiza los aspectos de seguridad energética recogidos en la Estrategia de Seguridad Nacional de 2013. El perfil del país definido en la Estrategia de Seguridad Energética es de un país dependiente energéticamente del exterior, sobre todo en el sector del petróleo y el gas y con avances en la producción eléctrica renovable y define la seguridad energética nacional como “la acción del Estado orientada a garantizar el suministro de energía de manera sostenible económica y medioambientalmente, a través del abastecimiento exterior y la generación de fuentes autóctonas, en el marco de los compromisos internacionales asumidos” [114]

2.4. LA DEPENDENCIA ENERGÉTICA

Según los datos de Eurostat, la dependencia energética de España al igual que el resto de los países de su entorno, no ha sufrido grandes variaciones cualitativas, es decir, que hagan ver un cambio en la dependencia energética en sí misma. La dependencia se ve aumentar de forma sostenida por el aumento de consumo en las épocas de expansión económica y se ha visto reducida a partir del año 2008 en el que comienza la crisis económica, con la consiguiente disminución del consumo energético. Esta evolución es en realidad muy previsible, en tanto que España no dispone de recursos naturales propios significativos para las tecnologías de producción energética dominante.

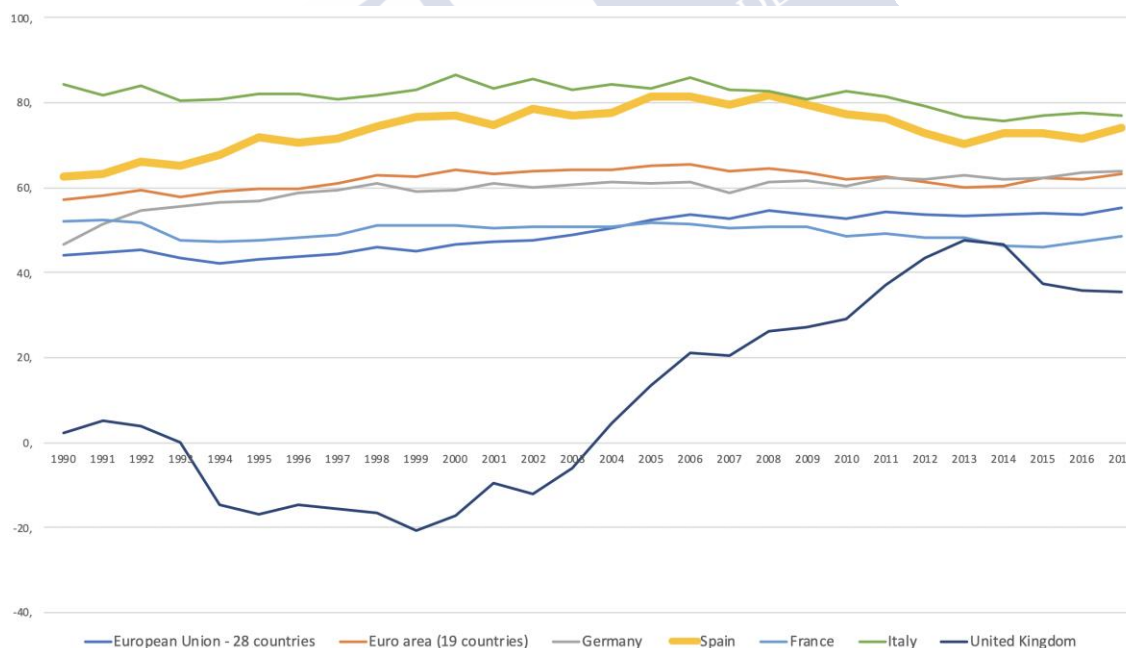


Figura 17: Dependencia energética España vs otros
Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [115]

Si nos comparamos con los países de nuestro entorno económico más próximo (Alemania, Francia, Italia), y dejando a un lado al Reino Unido debido a que dispone de importantes reservas petrolíferas (aun así, el crecimiento de su dependencia energética es mucho mayor al de los demás países que se citan) podemos observar dos aspectos principales. Por un lado, la dependencia energética de España es superior a la de los otros

países con economías de mayor tamaño (inferior en el caso de Italia, pero con tendencia a igualarse en los últimos años), por lo que es evidente que hay margen de mejora, seguramente en la eficiencia energética (Figura 17).

Por otro lado, en lo que respecta a la evolución de la dependencia energética en estos países, con la excepción ya citada del Reino Unido, los datos indican que, incluso en los períodos de mayor crecimiento económico, los valores en estos países han sido bastante estables en el tiempo, mientras que los datos de España han experimentado subidas no solo en ciclos de crecimiento económico positivo, sino incluso en períodos económicamente no expansivos. Solo la gran crisis económica de 2008 provocó el primer descenso en 18 años de la dependencia energética en España y su valor vuelve a recuperarse en cuanto se incrementa la actividad económica. Esto hace pensar que el descenso tiene más que ver con el menor consumo de energía debido a la recesión económica. En definitiva, en España las únicas palancas de actuación sobre la dependencia energética serían por un lado la disminución de la energía demandada (mediante la disminución en el consumo y mediante la introducción de medidas y de tecnología de eficiencia energética) y por otro lado el aumento en la producción renovable autóctona, que como decíamos anteriormente podría estar a su vez sujeta a condiciones de dependencia tecnológica y/o de materias primas. En la Figura 18 podemos observar el porcentaje de la energía renovable generada sobre el total, señalando también el objetivo del 20% en 2030.

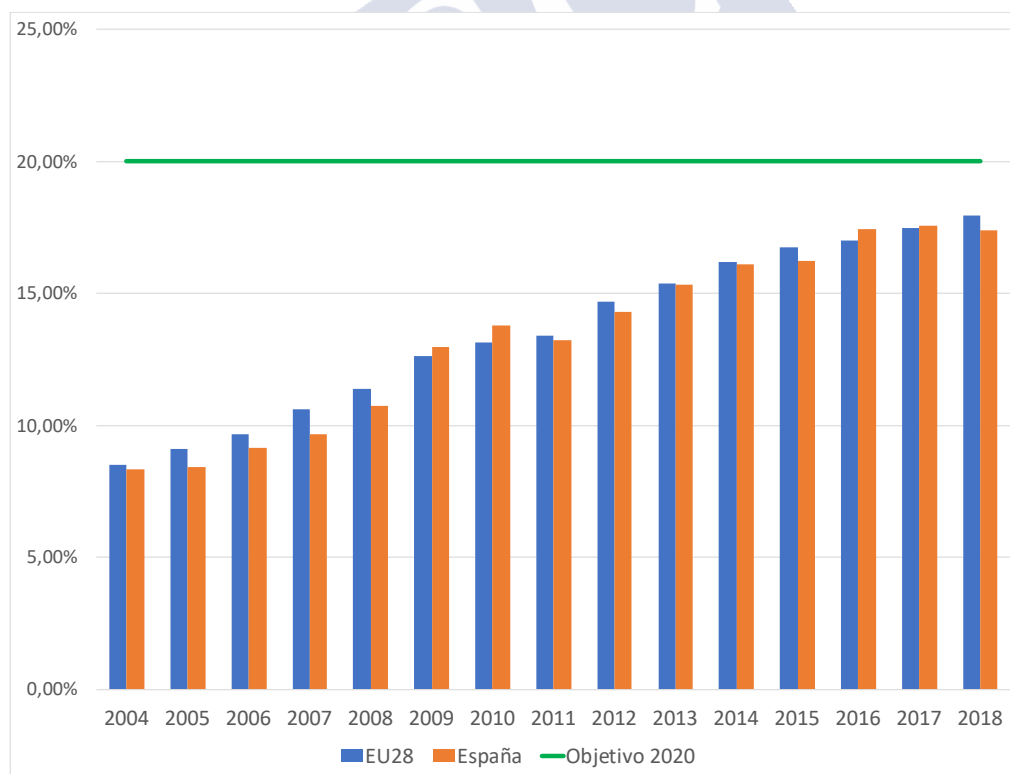
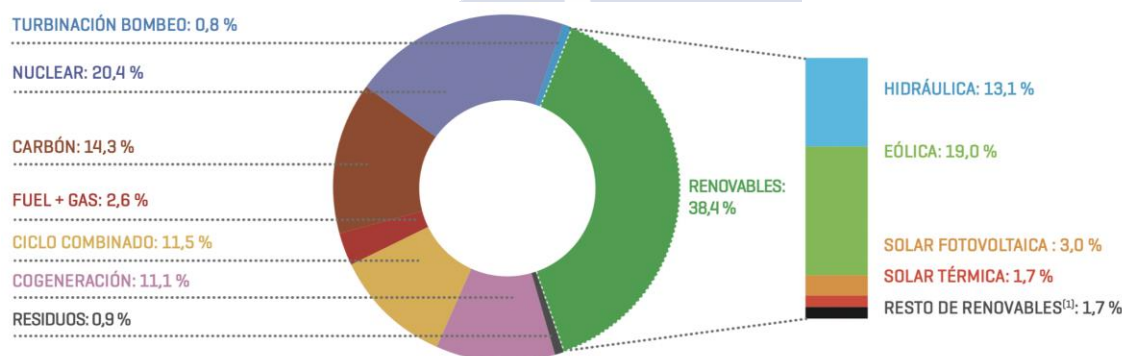


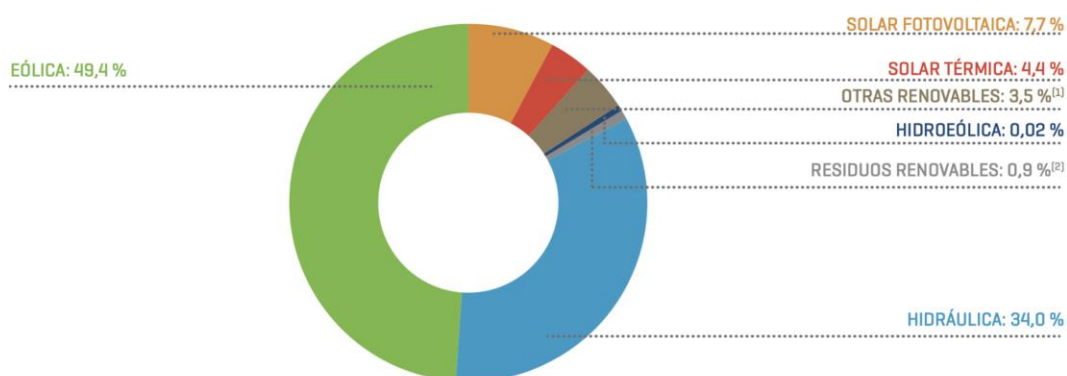
Figura 18: Porcentaje energía renovable - Combinado transporte, electricidad, calefacción
Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [116]

En cuanto a las variaciones anuales de consumo renovable por tecnología, la eólica aparece con buena producción y como una tecnología consolidada (Figura 20). También se puede apreciar un considerable incremento en los últimos años de la tecnología termosolar y de forma más tímida de la biomasa. Lo que no parece que despegue es la

tecnología fotovoltaica, por lo menos frente a las expectativas creadas con ella, lo que no deja de ser una ventana de oportunidad en el incremento de la producción renovable. Respecto a la tecnología hidroeléctrica, las variaciones se deben básicamente a las características hidrológicas de cada año. Respecto a la cogeneración se incluye en biocombustibles sólidos (excluyendo el carbón) que cubren materiales orgánicos no fósiles de origen biológico que pueden usarse como combustible para la producción de calor o la generación de electricidad. Son la suma de leña, residuos de madera y subproductos, bagazo, licor negro, otros materiales vegetales y residuos y desechos animales [117]. Otra oportunidad de mejora en el nivel de producción renovable lo tenemos en los residuos, entendiendo como tales los producidos por los hogares, la industria, los hospitales y el sector terciario, que es material biológico recogido por las autoridades locales e incinerado en instalaciones específicas [118] en los que vemos incluso una disminución en la producción energética. Por otro lado, la producción geotérmica es también muy escasa. Los datos comprenden energía disponible como calor emitido desde dentro de la corteza terrestre, generalmente en forma de agua caliente o vapor. Se explota como sitios adecuados para la generación de electricidad utilizando vapor seco o salmuera de alta entalpía después del destello o directamente como calor para calefacción urbana, agricultura, etc. [119].



[1] Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables.



[1] Incluye biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica.

[2] El 50 % de la generación procedente de residuos sólidos urbanos se considera renovable.

Fuente: Red Eléctrica de España. <http://www.ree.es>

Figura 19: Estructura de la producción eléctrica en España (2018) [112]

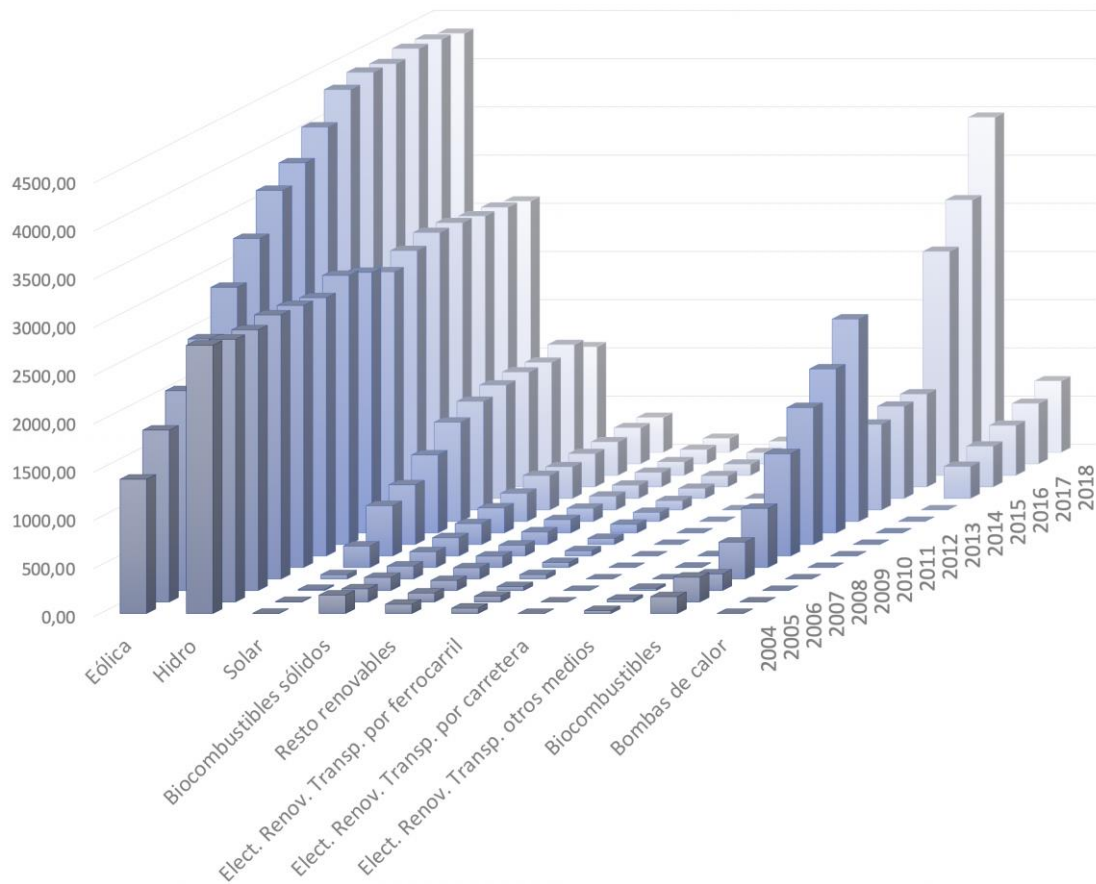


Figura 20: Producción de energía renovable por tipo en España (ktoe)
Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [116]

La Figura 21 muestra el incremento anual de la producción renovable con diversas tecnologías en España y en la Unión Europea (incluyendo a España). Llama la atención en el gráfico fuertes incrementos en España para algunas tecnologías en relación con los datos de la Unión Europea. Esto puede indicar una cierta precipitación regulatoria que lleva a inversiones en tecnologías sin que exista una planificación lo suficientemente precisa o que no esté conectada con la evolución económica e incluso tecnológica. En el gráfico se puede ver claramente los efectos regulatorios sobre la tecnología fotovoltaica explicados anteriormente.

A pesar del importante esfuerzo llevado a cabo en España en la implantación de la producción renovable, se ve un gran potencial de crecimiento en muchas tecnologías. Para evitar problemas como han sucedido en el pasado por precipitaciones regulatorias que pueden ser legítimamente aprovechadas por inversores de forma especulativa, es necesario realizar una planificación de implantación de las diferentes tecnologías que tenga en cuenta no solo un aspecto en concreto. La sostenibilidad no sólo tiene un aspecto ambiental, sino también económico y social e incluso ampliable a la gobernanza y la política. Si falla alguno de los aspectos el resultado no será satisfactorio, como se vio con la tecnología fotovoltaica que, tal y como estaba regulada, hacía insostenible económicamente el sector eléctrico.

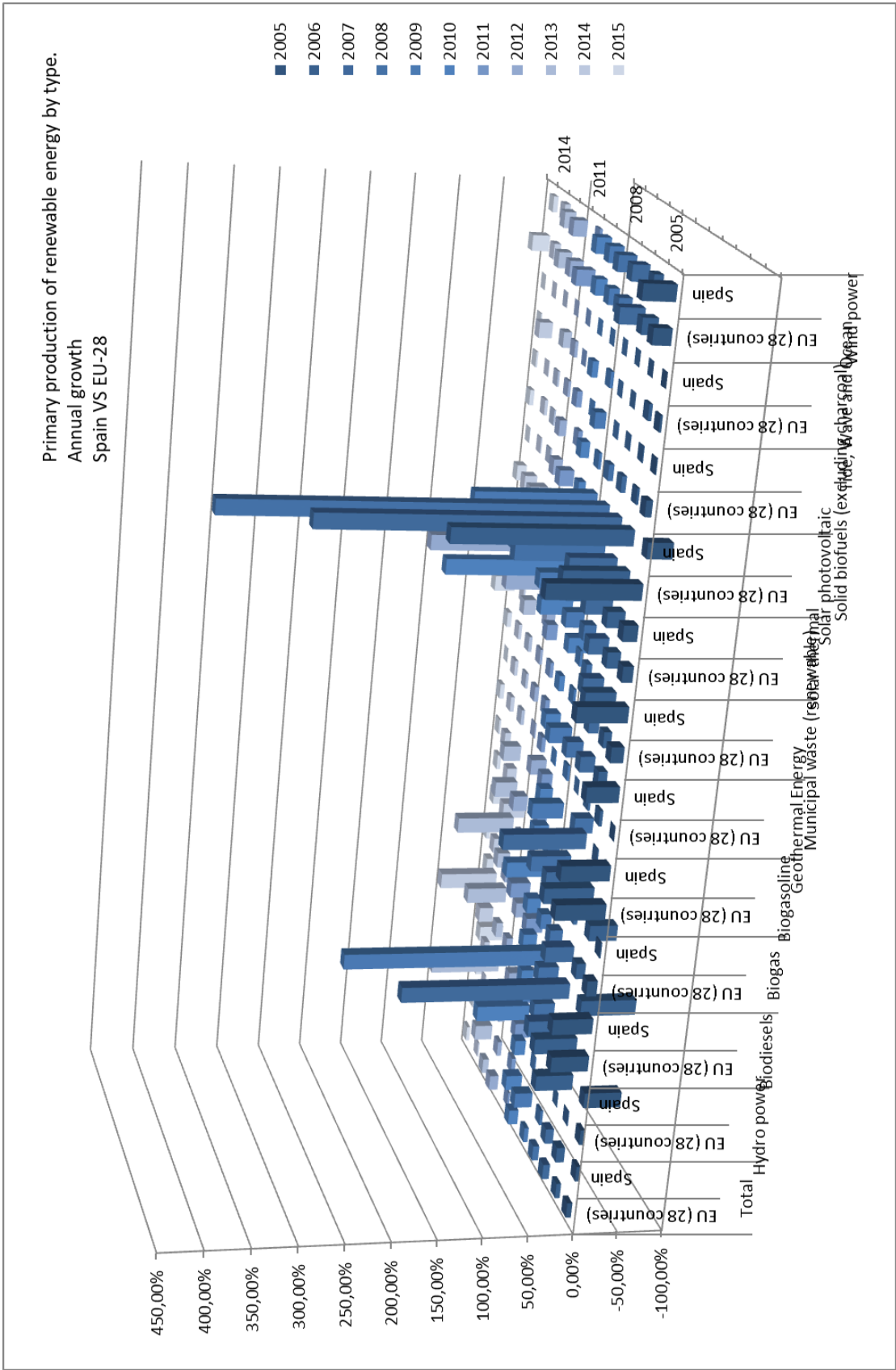


Figura 21: Producción de energía renovable por tipo - Crecimiento anual - España vs EU-28
Elaboración propia a partir de datos de Eurostat

En parte, por esa dificultad en la actuación sobre la dependencia energética con las tecnologías de producción actuales, el paradigma de la independencia energética se complementa con el concepto de la diversidad en el suministro de la energía [120]. En ese sentido la Unión Europea en su estrategia de seguridad energética propone diversificar las fuentes externas de abastecimiento y las infraestructuras correspondientes, centrándose especialmente en el gas, que desde hace años se percibe como el mayor problema de dependencia energética de la Unión Europea, y en los combustibles nucleares. La gran dependencia de Rusia para el abastecimiento de gas por parte de Europa que ya citábamos en párrafos anteriores y los problemas de suministro sufridos por varios países en los inviernos de 2006 y 2009 han sido claves, según reconoce la propia Comisión Europea, para la adopción de la estrategia europea de seguridad energética. En este sentido la comisión propone diversificar el suministro de gas con el Corredor Meridional del Gas, que uniría los yacimientos de gas natural del Mar Caspio en las costas de Azerbaiyán con Italia, atravesando Georgia (Gasoducto del Caspio Meridional, SCP), Turquía (Gasoducto Transanatólico, TANAP), Grecia y Albania (Gasoducto Transadriático) [121] y nuevas conexiones con Noruega. En el caso particular de España, el mayor suministrador con diferencia es Argelia y no hay importaciones de Rusia (Figura 22). No obstante, la forma en la que las perturbaciones del suministro de gas a Rusia pudiesen afectar a España, dependerían de las medidas que tomase la Unión Europea en este sentido, ya que la dependencia del gas de Rusia de Alemania e Italia es enorme.

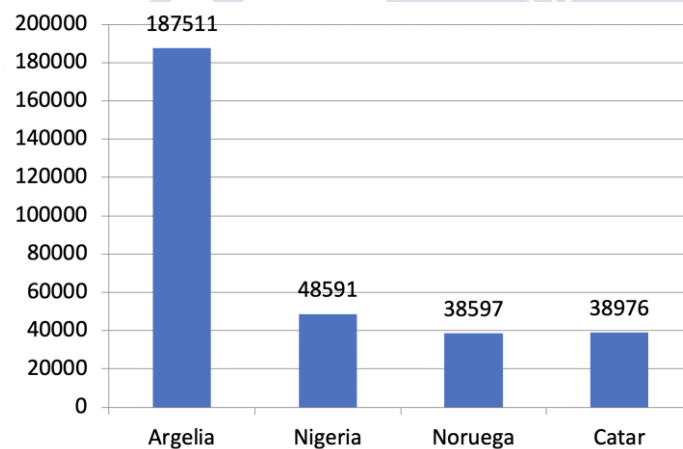


Figura 22: Importaciones de Gas Natural España (2017) en GWh
Elaboración propia a partir de [122]

Tal y como ya se indicó anteriormente, unos índices usados comúnmente para la medición de la diversidad energética con los *Shannon Wiener Index* (SWI), que da una medida de la diversidad y el *Herfindahl-Hirschmann Index* (HHI) que da un nivel de concentración. Según estudios realizados [120] España está bien situada en su mix energético en lo que respecta a la energía suministrada, mientras que en la diversidad de las importaciones el comportamiento es más irregular.

2.5. EQUIDAD ENERGÉTICA

Aunque, como ya hemos visto, la equidad energética es un punto fundamental de la seguridad y sostenibilidad energética, en general es un asunto que se ha empezado a tratar

de una forma muy superficial en los últimos años a raíz de la crisis económica y fundamentalmente por las dificultades para el uso de la calefacción en los hogares. Sin embargo, esto es un concepto mucho más amplio.

Dentro del concepto de equidad y, desde un punto de vista incluso activista, podríamos enmarcar la justicia energética, para la que se han identificado dimensiones [123]. Por un lado, una dimensión más técnica referida a la producción y a las diferentes tecnologías disponibles y al uso de la energía, y por otro una dimensión socio-económica de tipo distributivo y de procedimiento, como por ejemplo el emplazamiento de infraestructuras energéticas. Hay estudios que relacionan en algunos países el emplazamiento de estas infraestructuras con áreas socioeconómicamente deprimidas [124]. En lo que respecta al emplazamiento, el concepto de justicia energética tampoco es uniforme, en el sentido de lo que lo que puede ser adecuado desde el punto de vista ambiental por parte de diversas organizaciones o por otros motivos como racionalidad técnica o análisis económicos, puede causar rechazo a nivel local, como se ha visto con la instalación de parques eólicos en otros países e incluso aquí mismo en Galicia con las minicentrales hidráulicas al mismo nivel. Estos rechazos no deben ser infravalorados ya que, de no tener un adecuado reconocimiento, lo que algunos autores han identificado como una dimensión más de la justicia energética [125], puede derivar en nuevos rechazos a futuros proyectos, lo que puede ser un grave inconveniente en situaciones en las que, como en un futuro próximo, nos queremos encaminar hacia un nuevo modelo energético más descarbonizado, más electrificado y también más distribuido en el territorio. En otros casos existe un consenso mucho más amplio acerca del rechazo como sucede con los proyectos relacionados con la energía nuclear y en menor medida con los proyectos relacionados con el fracking. Esta es una dimensión distributiva, es decir cómo se reparten entre los miembros de la sociedad los costes y beneficios (no solo económicos sino también sociales y ambientales) de los procesos energéticos. En esta dimensión estaría enmarcada también la pobreza energética que creció en estos años no solo en España, sino también en el resto de Europa y en Norteamérica. Además del aspecto distributivo tendríamos, por otro lado, un aspecto más sociopolítico relacionado con aspectos de procedimiento, en el sentido de que la justicia energética necesita procedimientos equitativos para todos los interesados. La ausencia de esta equidad puede generar situaciones de inseguridad jurídica que puede dañar las inversiones necesarias para el desarrollo de infraestructuras energéticas, como se puede comprobar en la actualidad con los múltiples recursos y procedimientos judiciales y de arbitraje que han sido puestos en marcha contra el gobierno español debido a la modificación de las condiciones de retribución de las instalaciones renovables.

La equidad energética no es solo un concepto aplicable a la seguridad energética, sino a la seguridad nacional. Si la sociedad o parte de ella percibe como injusta una situación de este tipo se pueden generar situaciones que afecten a la seguridad en general. Hemos visto en los últimos años como el emplazamiento del almacenamiento temporal de residuos nucleares ha sido objeto de constantes polémicas que ha retrasado la construcción de una instalación necesaria para garantizar la seguridad en el tratamiento de los residuos nucleares. En este sentido, es fundamental la participación de toda la sociedad, para lo cual es necesaria transparencia y acceso a toda la información disponible para alcanzar el mayor consenso posible en los proyectos de las infraestructuras energéticas.

2.6. LA SEGURIDAD DE LAS INFRAESTRUCTURAS

El sector energético tiene la particularidad de que muchas de sus infraestructuras se encuentran desplegadas por todo el territorio. Excepto en el caso de los grandes centros

de producción existen muchas instalaciones sin personal presente, así como otras infraestructuras de tipo lineal como líneas eléctricas, gasoductos y oleoductos cuya vigilancia constante es imposible y son sensibles en lo que respecta a la seguridad energética a incidencias, ya sea accidentales o provocadas. En este sentido cobran especial importancia, por un lado, los centros de control que pueden detectar las alteraciones en el servicio de las infraestructuras y por otro lado la redundancia de instalaciones importantes que puedan sustituirse mutuamente en caso de fallo.

Otro aspecto de seguridad más reciente es la ciberseguridad. En los últimos años a nivel internacional se han producido ataques relevantes sobre infraestructuras de forma que en 2015 230.000 personas estuvieron sin suministro eléctrico durante casi seis horas por un ataque informático [126]. Esto en sí mismo no solo afecta a la seguridad energética, sino que la seguridad natural se ve afectada no solo por los posibles efectos de los incidentes sobre las infraestructuras energéticas sobre el medio ambiente, sino que este puede verse directamente afectado por estos. En el año 2000 una planta de tratamiento de aguas residuales en Australia (Maroochy Shire) realizó un vertido de un millón de litros de estas aguas por un ataque informático [126]. En los últimos años se han producido otros incidentes relacionados con ciberataques causando importantes incidencias en el servicio, lo que pone de manifiesto la necesidad de establecer mecanismo de protección de estas infraestructuras. Ucrania ha sido víctima de estos ataques de forma significativas, con eventos en 2015, 2016 y 2018 [126].

En España están identificados doce sectores estratégicos definidos en el anexo de la Ley 8/2011 de protección de las infraestructuras críticas, es decir, sectores que proporcionan un servicio esencial o que garantiza el ejercicio de la autoridad del Estado o de la seguridad del país. Entre estos sectores destacan por su afección a la seguridad natural y la energética, el sector de la energía, el nuclear, el químico, el transporte y el agua y a los que son de aplicación el RDL 12/2018 de seguridad de las redes y sistemas de información.

El nivel de criticidad de una infraestructura está relacionado con su efecto sobre los servicios esenciales, es decir aquellos necesarios para el mantenimiento de las funciones sociales básicas, la salud, la seguridad, el bienestar social y económico de los ciudadanos o el funcionamiento del Estado. En este sentido una infraestructura es estratégica si es la que permite el funcionamiento de los servicios esenciales y además es crítica si su funcionamiento es indispensable y no permite soluciones alternativas.

En España el Centro Nacional para la Protección de Infraestructuras y Ciberseguridad (CNPIC) es el órgano de coordinación y supervisión de todas las actividades relacionadas con la protección de las este tipo de infraestructuras en el territorio nacional y junto con el Centro de Inteligencia contra el Terrorismo y el Crimen Organizado (CITCO), las fuerzas y cuerpos de seguridad del estado y los operadores de las infraestructuras críticas son los participantes en el Plan Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas (PNPIC) [127]. En materia de ciberseguridad el órgano técnico de coordinación es la Oficina de Coordinación Cibernética (OCC). Los operadores de infraestructuras críticas, para la resolución de incidentes de ciberseguridad tienen como referencia al INCIBE-CERT (Computer Security Response Team), que está operado conjuntamente por INCIBE (Instituto Nacional de Ciberseguridad) y el CNPIC [128], [129].

En 2016 el 0,4% de los incidentes gestionados tuvieron como objetivo las infraestructuras críticas y fueron un total de 479 incidentes, lo que supone un aumento de un 368% respecto a los 130 incidentes de 2015 y un 760% más respecto a los 63 incidentes de 2014. De ellos 126 fueron en el sector de la energía, lo que supone un 26% de los incidentes, solo superados por el sistema tributario y financiero con un 32% [128].

La información y la valoración relativa a las infraestructuras estratégicas está contenida en el Catálogo Nacional de Infraestructuras Estratégicas, que en la actualidad cuenta con más de 3.500, entre las que están las Infraestructuras Críticas. La inclusión de una instalación en el catálogo es una decisión de la Secretaría de Estado de Seguridad a través del CNPIC, que se comunica con los operadores de las Infraestructuras Críticas a través del sistema de información HERMES, que permite un intercambio fluido de la información [130] que permite conocer de forma permanente el estado de estas instalaciones.

El Nivel de Alerta en Infraestructuras Críticas (NAIC) es una escala de cinco niveles (1: Bajo, 2: Moderado, 3: Medio, 4: Alto y 5: Muy Alto) que, generalmente, coincide con el nivel de alerta antiterrorista, aunque puede variar en función de la valoración de las amenazas [131] (Figura 23).



Figura 23: Nivel de Alerta en Infraestructuras Críticas (25/11/2019) [131]

Nivel de Alerta Antiterrorista (NAA)



Figura 24: Nivel de Alerta Antiterrorista (25/11/2019) [132]

2.7. MÉTRICAS DE LA SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD

Como sucede en cualquier ámbito, el establecimiento de métricas puede ayudar al tratamiento científico de la seguridad energética ya sea de forma específica o entendiendo la seguridad energética englobada en conceptos más amplios.

Ya se ha descrito anteriormente la falta de unanimidad a la hora de definir la seguridad energética y esto es debido a la multiplicidad de puntos de vista sobre el que abordar el concepto más allá de conceptos básicos como puede ser la dependencia de recursos concentrados en terceros países, entendiendo que dichos recursos no tienen necesariamente por qué ser exclusivamente energéticos, sino tecnológicos, materias primas o conocimiento necesarios para la fabricación de elementos de producción energética en otros lugares. Estas diferentes visiones de la seguridad energética hacen que los aspectos considerados para el establecimiento de las métricas sean muy diversos [133].

En el suministro de energía primaria los aspectos fundamentales serían la disponibilidad de los recursos y el coste medio de producción y sus fluctuaciones. En el caso de los mercados mayoristas y de importación de energía fundamentalmente se analizan riesgos, ya sean específicos de un determinado agente o actividad o sistemáticos que puedan afectar a todos. En este sentido se analiza la disminución de riesgos a través de la diversidad en los mercados [134]. Métodos comunes en valorar la diversidad son los índices *Herfindal-Hirschman* o el *Shannon-Wiener*. Otro aspecto en la valoración de los riesgos es a través de la optimización de carteras financieras a través del análisis del histórico de la volatilidad de los precios. Por último, indicadores de la fiabilidad de las rutas de transporte de energía y de la posibilidad del uso de los recursos energéticos como arma a través de restricciones en el suministro cerrarían el conjunto de indicadores correspondientes al análisis de los riesgos de los mercados. A nivel interno de los países, los indicadores se centran en la fiabilidad de la infraestructura energética, usando datos históricos sobre fallos y reparaciones de sistemas (por ejemplo, el TIEPI (Tiempo de Interrupción Equivalente a la Potencia Instalada) en el caso de redes eléctricas en España o su equivalente internacional SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)). También a nivel interno de los países se desarrollan indicadores acerca de la vulnerabilidad, robustez y resiliencia de los sistemas energéticos. En lo que respecta a la vulnerabilidad económica, además de lo ya mencionado para los mercados, se buscan índices para el coste de las interrupciones del suministro (VoLL: *Value of Lost Load*).

En definitiva, los indicadores energéticos son herramientas para la evaluación del desempeño de un sistema energético y pueden revelar aspectos clave en las relaciones entre el uso de la energía, su precio y la actividad económica. Debido a la gran cantidad de indicadores que existen se desarrollan índices a través de la integración de los indicadores [135] resultado de varias de las perspectivas citadas mediante los que se pueden desarrollar tomas de decisiones a través, por ejemplo, de análisis multicriterio.

2.7.1. *Energy Trilemma Index*

En el establecimiento de este índice, se define la seguridad energética como la capacidad que tiene un país para satisfacer la demanda de energía actual y futura de manera confiable así como para soportar y recuperarse rápidamente de las perturbaciones del sistema con una interrupción mínima del suministro teniendo en cuenta tanto las fuentes de energía primaria tanto internas como externas, como la fiabilidad y resistencia de la infraestructura energética, es decir, esta definición únicamente recoge la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía que recoge la definición de la Agencia Internacional de la Energía. Para la seguridad energética se tienen en cuenta la

dependencia de las importaciones de energía, la diversidad de generación eléctrica y la capacidad de almacenamiento de energía para satisfacer la demanda de petróleo y gas (incluida la capacidad de refinado). La segunda parte de la definición (a precio asumible) la recoge la segunda dimensión del trilema que es la equidad energética, que define como la capacidad que tiene un país para proporcionar un acceso universal a la energía de forma fiable, asequible y abundante para el uso doméstico y comercial. Para ello se tiene en cuenta el porcentaje de población con acceso a la electricidad y los precios de la electricidad, gasolina y diésel. La tercera dimensión del trilema extiende el alcance a la sostenibilidad ambiental de los sistemas energéticos que representa la transición del sistema energético de un país para mitigar y evitar los posibles daños ambientales y los impactos del cambio climático a través de la productividad y la eficiencia de la generación, del transporte y de la distribución, así como la descarbonización y la calidad del aire. Para ello se considera la intensidad energética (consumo sobre PIB), el porcentaje de generación eléctrica de fuentes descarbonizadas y las emisiones de CO₂ per cápita. Todos los parámetros citados se enmarcan en el contexto del país en términos de estabilidad macroeconómica (inflación y política fiscal), efectividad del gobierno en lo que respecta a los servicios públicos y la capacidad de puesta en marcha de políticas y también por la capacidad de innovación del país. En 2019, el índice, que incluye a un total de 128 países sitúa a España en el puesto 18 (Tabla 7). En lo que respecta a la evolución en el tiempo de España se puede apreciar una mejora relevante de la sostenibilidad ambiental durante el período 2008-2012, continuando con un comportamiento estable a partir de ese año. En 2007 se produce un descenso en el desempeño de seguridad energética que, después de mantenerse estable se recupera en 2015 a valores de 2007, permaneciendo estable desde entonces. La equidad energética se ha mantenido constante a lo largo del tiempo (Figura 25).

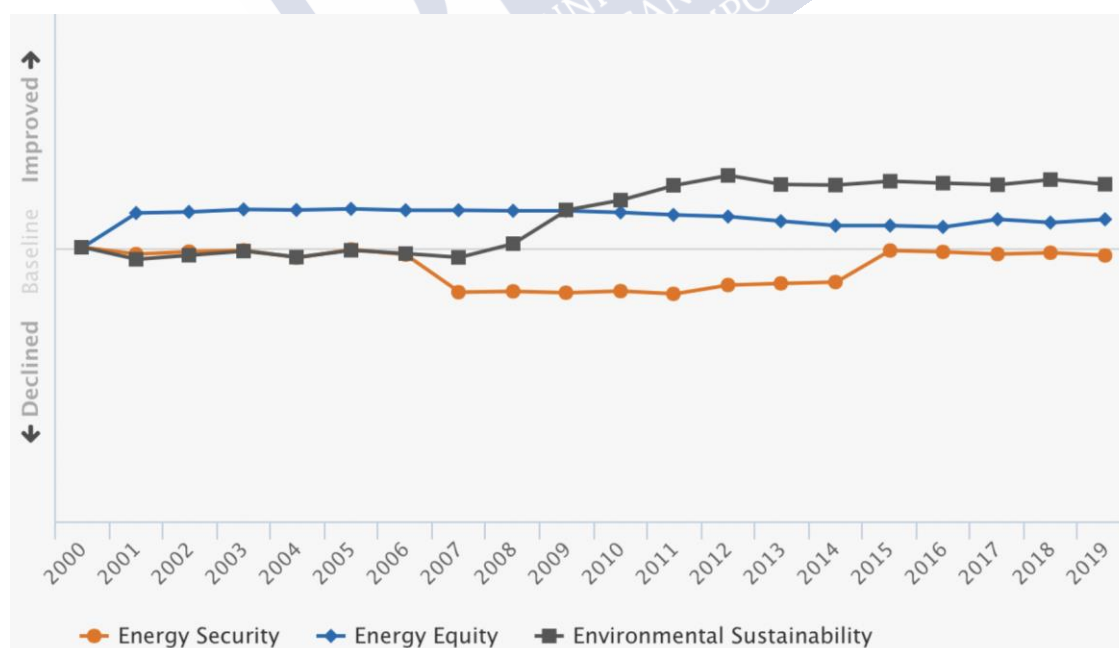


Figura 25: Evolución de los parámetros del trilema para España [84]

Tabla 7: Índice del trilema energético de los países de la Unión Europea
Autor a partir de [84]

Posición Índice	País	Calif.	Puntuación Trilema	Posición Seguridad Energética	Posición Equidad Energética	Posición Sostenibilidad Ambiental
2	Suecia	AAA	85.2	1	40	3
3	Dinamarca	AAA	84.7	2	28	2
4	Reino Unido	AAA	81.5	28	19	6
5	Finlandia	AAA	81.1	3	33	28
6	Francia	AAA	80.8	27	29	4
7	Austria	AAA	80.7	18	22	16
8	Luxemburgo	BAA	80.4	56	1	8
9	Alemania	AAA	79.4	16	30	23
12	Eslovenia	AAA	79.2	9	39	17
14	Holanda	BAB	77.8	39	8	43
16	República Checa	AAB	77.4	10	36	40
18	España	BAA	77.0	36	37	18
19	Hungría	AAB	76.8	12	35	33
20	Italia	BAA	76.8	37	23	20
22	Letonia	ABA	76.1	4	60	25
23	Eslovaquia	ABA	75.6	26	56	10
24	Bélgica	BAA	75.2	68	31	27
25	Irlanda	CAA	75.2	96	12	24
26	Rumania	ABA	75.1	8	64	12
27	Croacia	ABA	74.9	24	43	26
29	Portugal	BBB	74.0	54	42	34
30	Estonia	BAB	73.8	31	38	63
33	Malta	DAA	72.9	119	27	15
36	Lituania	CBA	72.4	74	51	21
41	Bulgaria	BBB	71.3	33	50	49
47	Grecia	CBA	69.5	99	45	30
53	Polonia	BBB	68.3	70	55	58
54	Chipre	DBB	67.9	122	41	45

Tabla 8: Índice del trilema energético de otros países
Autor a partir de [84]

Posición Índice	País	Calif.	Puntuación Trilema	Posición Seguridad Energética	Posición Equidad Energética	Posición Sostenibilidad Ambiental
1	Suiza	AAA	85.8	11	11	1
10	Nueva Zelanda	AAA	79.4	20	26	29
11	Noruega	CAA	79.3	73	20	5
13	Canadá	AAC	78.0	5	21	67
15	Estados Unidos	AAB	77.5	17	14	54
28	Australia	BAB	74.7	43	24	57
31	Japón	CAB	73.8	82	32	39
32	Israel	CAB	73.3	78	13	52
37	Corea del Sur	BAC	71.7	69	16	80
39	Brasil	ABA	71.6	19	78	19
40	Méjico	ABB	71.3	23	57	50
42	Rusia	AAC	71.2	25	18	96
61	Ucrania	ACC	66.0	7	85	65
72	China	BBD	63.7	35	70	108

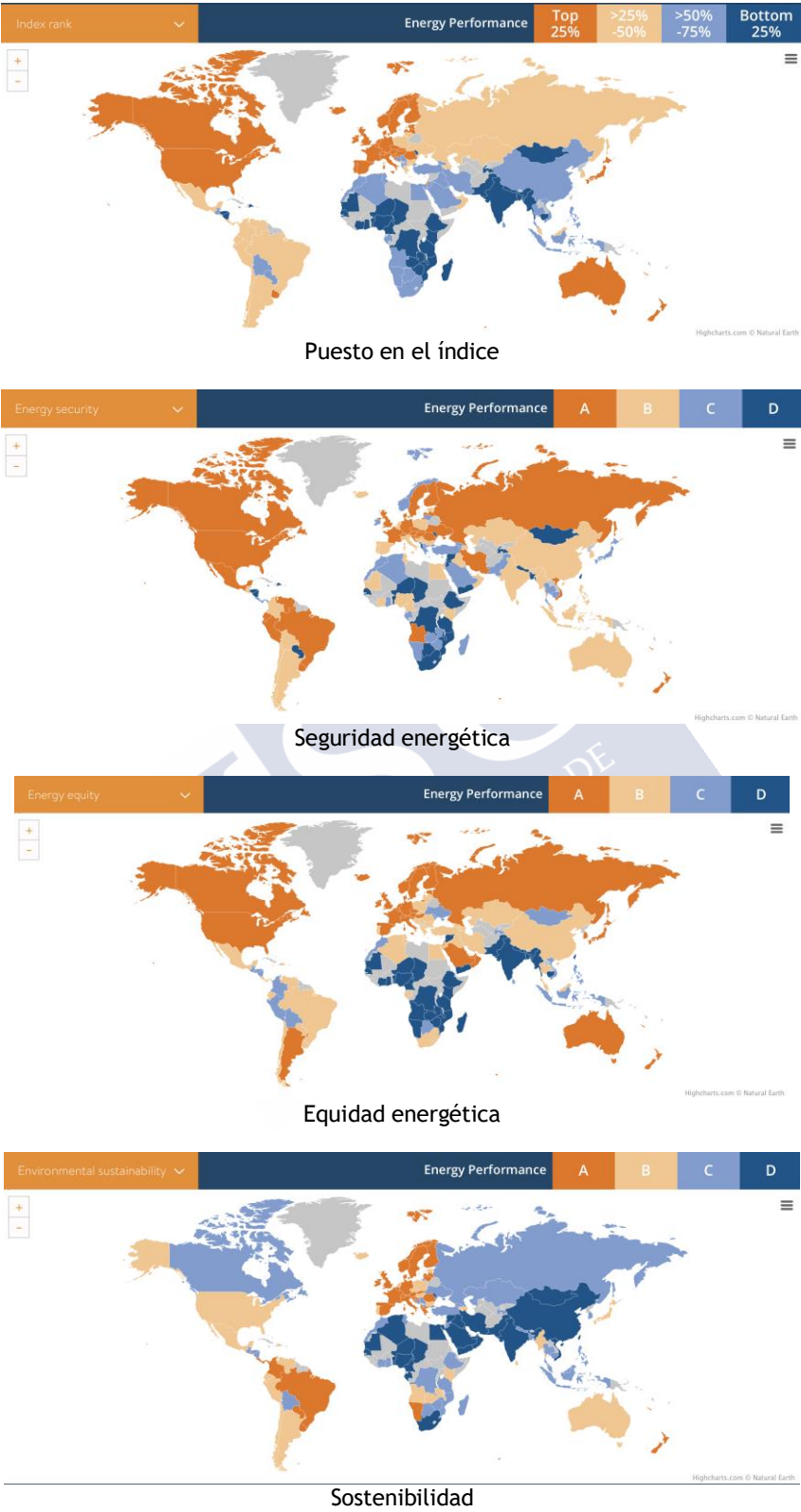


Figura 26: Índice mundial del trilema energético y su desglose
Adaptado de [84]

2.7.2. *Energy Architecture Performance Index (EAPI)*

Otro índice que se indicaba anteriormente como generalmente aceptado por las instituciones es el *Energy Architecture Performance Index* (EAPI) [136] desarrollado por el Foro Económico Mundial (WEF). Este índice se basa en 18 indicadores agrupados en tres visiones diferentes: Crecimiento económico y desarrollo, Sostenibilidad Ambiental, Seguridad Energética y Acceso a la Energía. Como en el caso anterior, este índice entiende la seguridad energética como un concepto que está dentro de un marco más amplio. Los indicadores que forman este índice que corresponderían a la seguridad energética estarían relacionados con la autosuficiencia y la diversidad del suministro y serían los indicados en la Tabla 9.

Tabla 9: Indicadores correspondientes a la seguridad energética en el EAPI
Elaboración propia a partir de [136]

Grupo	Subgrupo	Indicador	Peso en el índice
Acceso a la energía y seguridad energética	Autosuficiencia	Diversificación de las importaciones.	(importadores netos) 0 (exportadores netos)
		Importaciones de energía (% uso energético)	0.2
	Diversificación en el suministro	Diversificación del total en el suministro de energía primaria	0.1 (importadores netos) 0.2 (exportadores netos)

A la vista de los indicadores usados para la seguridad energética, y teniendo en cuenta los aspectos, dimensiones y visiones que veremos a lo largo de este texto, parece que este índice se queda corto para medir la seguridad energética del país. Sin embargo, en el grupo de indicadores correspondiente al crecimiento económico y desarrollo existen tres asociados a los precios asumibles que complementados con los anteriores hacen que el índice sea aceptable para la evaluación de la seguridad energética. En este caso los datos para 2017 son los indicados en la Tabla 10:

Tabla 10: *Energy Architecture Performance Index* (2017) [136]

Posición en el índice	País	Puntuación 2017	Crecimiento Económico y Desarrollo	Sostenibilidad Medioambiental	Seguridad Energética y Acceso a la Energía	2009-17 variación
1	Suiza	0,80	0,74	0,77	0,88	(+1)
2	Noruega	0,79	0,67	0,75	0,95	(-1)
3	Suecia	0,78	0,63	0,80	0,90	(+1)
4	Dinamarca	0,77	0,69	0,71	0,91	(+1)
5	Francia	0,77	0,62	0,81	0,88	(-2)
6	Austria	0,76	0,67	0,74	0,88	(+2)
7	España	0,75	0,65	0,73	0,87	(+4)
8	Colombia	0,75	0,73	0,68	0,83	(+2)
9	Nueva Zelanda	0,75	0,59	0,75	0,90	(+3)
10	Uruguay	0,74	0,69	0,71	0,82	(+15)
11	Portugal	0,74	0,63	0,73	0,85	(+2)
12	Finlandia	0,73	0,55	0,79	0,87	(-6)
13	Eslovenia	0,73	0,58	0,73	0,88	(+6)
14	Costa Rica	0,73	0,68	0,76	0,74	(-5)
15	Reino Unido	0,72	0,62	0,66	0,89	(=)
16	Irlanda	0,72	0,69	0,65	0,81	(+6)
17	Letonia	0,71	0,62	0,73	0,80	(=)
18	Croacia	0,71	0,63	0,68	0,84	(+12)

Posición en el índice	País	Puntuación 2017	Crecimiento Económico y Desarrollo	Sostenibilidad Medioambiental	Seguridad Energética y Acceso a la Energía	2009-17 variación
19	Alemania	0,71	0,62	0,64	0,88	(-5)
20	Eslovaquia	0,71	0,56	0,74	0,84	(+12)
21	Hungría	0,71	0,62	0,72	0,79	(+8)
23	Luxemburgo	0,70	0,73	0,62	0,76	(+14)
24	Rumania	0,70	0,66	0,65	0,79	(+15)
29	Italia	0,70	0,58	0,67	0,84	(-6)
31	Republica Checa	0,69	0,58	0,62	0,88	(+5)
32	Canadá	0,69	0,58	0,61	0,88	(-4)
33	Holanda	0,69	0,54	0,65	0,88	(-13)
34	Bélgica	0,69	0,52	0,71	0,83	(-7)
35	Lituania	0,68	0,57	0,70	0,78	(-9)
37	Polonia	0,67	0,66	0,56	0,80	(+4)
38	Grecia	0,67	0,61	0,59	0,81	(-4)
48	Rusia	0,65	0,55	0,60	0,80	(-15)
52	Estados Unidos	0,65	0,54	0,50	0,89	(+2)
56	Estonia	0,64	0,57	0,60	0,75	(-5)

En este caso España aparece en el puesto 7 de un total de 127 países, y se puede apreciar una mejora de 4 posiciones respecto al año 2009. Los países europeos ocupan la mayor parte de los primeros puestos. Sin embargo, también se puede ver a grandes países de la Unión Europea relativamente alejados del primer puesto, como Alemania (19), Italia (29) y Polonia (37). También es llamativo que países con grandes consumos de energía se encuentren alejados de las primeras posiciones e incluso próximos a las últimas: Japón (45), Rusia (48), Estados Unidos (52), India (87), China (95).

2.7.3. International Index of Energy Security Risk

El diseño de este índice permite comparaciones en los riesgos asociados a la seguridad energética entre países y entre grupos de países y sus cambios en el tiempo y lo hace de dos maneras: en términos absolutos y en términos relativos respecto a la línea base representada por los países de la OCDE [137]. La edición de 2018 del índice presenta los datos de 2016, que se indican en la Tabla 11.

Tabla 11: International Index of Energy Security Risk (2018) [137]

País	Puntuación	Posición	Variación Informe anterior (2016 con datos de 2014)
Noruega	678	1	=
Estados Unidos	765	2	+2
Reino Unido	769	3	+3
Méjico	788	4	-2
Dinamarca	788	5	=
Nueva Zelanda	802	6	-3
Canadá	842	7	=
OCDE	846		
Australia	875	8	=
Alemania	905	9	=
Polonia	974	10	+1
Francia	1023	11	-1
Rusia	1027	12	+8

País	Puntuación	Posición	Variación Informe anterior (2016 con datos de 2014)
Holanda	1054	13	+3
Sudáfrica	1066	14	+4
China	1079	15	+6
España	1096	16	-4
Brasil	1099	17	+6
Italia	1102	18	-5
Indonesia	1147	19	-2
India	1153	20	-1
Japón	1154	21	-6
Turquía	1198	22	-8
Corea del Sur	1389	23	-1
Tailandia	1556	24	=
Ucrania	1842	25	=

Vemos a España en el puesto 16 de 25 países con un descenso de 4 puestos con relación al informe anterior correspondiente a 2016, y el informe destaca, por un lado la gran dependencia de energía primaria, lo que hace elevar el riesgo. También destaca en el alto coste de la electricidad. En la parte positiva, destaca la diversidad de su sector energético, la mayor eficiencia en el uso de la energía respecto a otros países con niveles de importación energética similar. El hecho de que la intensidad energética en España sea menor que la media de la OCDE ayuda a moderar el impacto del incremento de los costes energéticos. Excepto en lo referido a los precios de la electricidad, sobre todo en el ámbito minorista, las mejores posiciones que obtiene España se dan en el sector eléctrico, donde alcanza la primera posición en diversidad de la producción eléctrica y la sexta en la generación descarbonizada. El índice se compone de los parámetros indicados en la Tabla 12.

Tabla 12: Métricas que forman el índice y posición de España en cada uno de ellos [137]

Métrica	Componente	Posición España (de 25)
Métricas de importaciones de combustible	Exposición a las importaciones de petróleo	24
	Exposición a las importaciones de gas natural	24
	Exposición a las importaciones de carbón	18
	Exposición total a las importaciones energéticas	21
	Gastos de importación de combustibles fósiles por PIB	16
Métricas de gasto por energía	Gasto por intensidad energética	7
	Gastos energéticos per cápita	14
	Precios minoristas de la electricidad	22
Métricas de volatilidad de precios y mercado	Gastos por volatilidad en la energía	12
	PIB per cápita	13
Métricas de uso y de intensidad energética	Consumo de energía per cápita	12
	Intensidad energética	7
	Intensidad del petróleo	8
Métricas del sector eléctrico	Diversidad de la producción eléctrica	1
	Producción descarbonizada	6
Métricas del sector del transporte	Energía del transporte per cápita	15
	Intensidad energética del transporte	10
Métricas medioambientales	Emisiones de CO ₂	13
	CO ₂ per cápita	11
	Intensidad de CO ₂ PIB	8

2.8. LAS INTERDEPENDENCIAS ENTRE LA SEGURIDAD ENERGÉTICA, LA SEGURIDAD NATURAL Y LA SOSTENIBILIDAD

El concepto actual de sostenibilidad procede de la definición de desarrollo sostenible presentada en el Informe *Brundtland* (Nuestro Futuro Común) de 1987 elaborado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas. En este informe se define el desarrollo sostenible (“desarrollo duradero” en el texto original en español del informe) como aquel que “satisfaga las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” [138], poniendo el foco en la necesidad de la erradicación de la pobreza. El desarrollo y la implantación más o menos exitosa a nivel internacional de las políticas de desarrollo sostenible tuvieron lugar a través de hitos como la Cumbre de Río de Janeiro de 1992 [139] (Programa 21), la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002 (Plan de Aplicación de Johannesburgo), y la nueva Cumbre de Río de 2012. Finalmente, en 2015 las Naciones Unidas adoptaron la Agenda 2030 con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible entre los que se encuentran el objetivo número 7: Energía asequible y no contaminante y 13: Acción por el clima [86].

A nivel europeo, en 2001 la Comisión Europea en su Comunicación COM(2001)264 “Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible” identificaba como una de las principales amenazas al desarrollo sostenible el calentamiento global, y se marcaba como objetivos la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en un 1% anual hasta los niveles de 1990, hasta el año 2020, mediante medidas sobre fiscalidad de los productos energéticos, eliminación progresiva de subvenciones a combustibles fósiles y medidas indirectas de desarrollo de energías alternativas, el establecimiento de un mercado de CO₂ para 2005, objetivos para combustibles alternativos y biocombustibles, reducción de la demanda de energía mediante la eficiencia energética y apoyo a la investigación, desarrollo y difusión de tecnologías sobre recursos energéticos limpios y renovables y energía nuclear más segura (residuos nucleares) [140].

En paralelo comenzó la preocupación internacional sobre los efectos sobre el clima de la actividad humana. En 1997, mediante el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se acordó la reducción de emisiones de una serie de gases de efecto invernadero en un 5% respecto a los niveles de 1990 entre 2008 y 2012. Los gases a reducir eran el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso (N₂O) y los fluorados HFC (hidrofluorados), PFC (perfluorocarbonos) y el SF₆ [141]. El Protocolo de Kioto tiene un segundo período de vigencia (2013-2020) acordado en la COP18 (Cumbre de Doha) y añade como gas de efecto invernadero otro fluorado, el trifluoruro de nitrógeno (NF₃) [142]. El otro gran acuerdo climático es el acuerdo de París (COP21) que pretende limitar el incremento de la temperatura media global a 2 °C respecto a niveles preindustriales y recomendando su limitación a 1,5 °C. En 2018 el IPCC destaca la gran diferencia entre los efectos del aumento de la temperatura en 2 °C y 1,5 °C [90].

Un enfoque generalmente aceptado, procedente del propio Informe *Brundtland*, sobre la sostenibilidad hace que se componga de tres dimensiones: económica, social y ambiental, de forma que para que se produzca un desarrollo sostenible real, el desarrollo de las tres dimensiones debe ser equilibrado, ya que unas interfieren en las otras. Este enfoque generalmente se representa por tres círculos superpuestos cuyas intersecciones representan los aspectos comunes entre dos de las dimensiones, mientras que la intersección central de los tres círculos representa la sostenibilidad. Este conocido diagrama fue definido en el Congreso Mundial de la Naturaleza de 2004 en Bangkok de

la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN) [143] [144]. Como a cualquier teoría con aceptación general, esta se ha visto revisada por múltiples autores elevando el número de dimensiones al considerar otros aspectos. De hecho, en la interpretación realizada por las Naciones Unidas a raíz de la Agenda 2030 añade dos dimensiones más: alianzas y paz [145], estableciéndolas como componentes de un marco necesario para alcanzar las otras tres. En 2010 la UNESCO añade una cuarta dimensión a las tres iniciales: la política o de gobernanza [146]. Esta estructura es la que vamos a utilizar en el texto para analizar diferentes elementos de sostenibilidad en la energía, dado el fuerte carácter regulado que tiene este sector y como afectan las decisiones de gobernanza a su desarrollo. En este sentido, podemos contemplar la seguridad energética como un elemento del desarrollo sostenible en tanto que es un elemento fundamental para el desarrollo económico, en el sentido de que este no es posible sin una energía en las condiciones que previamente ya se han definido para la seguridad energética. En el marco de las cuatro A, para el desarrollo económico son fundamentales la disponibilidad, accesibilidad y asequibilidad, pero esta última también es fundamental para el desarrollo social con el objeto de garantizar un acceso universal y justo de toda la población a la energía. El cuarto elemento de las cuatro A, la aceptabilidad, está directamente relacionada con el desarrollo ambiental, en cuanto la energía utilizada para el desarrollo social y económico debe cumplir con los estándares ambientales definidos en cada momento por los compromisos adquiridos en materia de energía y clima si lo que estamos considerando es un sistema nacional o internacional o los marcos legales o de propia responsabilidad corporativa si hablamos de empresas. Otro aspecto relacionado con la seguridad energética y natural son las materias primas y recursos energéticos que podemos considerar encuadrada en el conservacionismo al afectar directamente tanto al desarrollo económico como al ambiental.

El papel de la energía en el desarrollo social se ve reflejado en diferentes aspectos como la afección de las infraestructuras energéticas a elementos patrimoniales protegidos, su papel fundamental en el desarrollo de zonas rurales que puede verse limitado por problemas de calidad del suministro. También es necesario tener en cuenta dentro de este ámbito el empleo y la actividad económica asociada a las tecnologías en funcionamiento y a las que vayan a sustituirlas. Las transiciones justas deben tener muy en cuenta este aspecto para evitar situaciones sociales no deseadas ya experimentadas en situaciones de previas de transformaciones importantes, como vimos en la segunda mitad del siglo pasado con las reconversiones industriales y la deslocalización de la producción.

El desarrollo de infraestructuras energéticas para cualquier punto del ciclo de uso de la energía puede también encontrar un fuerte rechazo social por el temor a los efectos de dichas infraestructuras, aún en el caso de que la parte de la sociedad afectada pueda, en mayor o menor medida, ser consciente de la necesidad de dichas infraestructuras. Esto es habitualmente conocido con NIMBY (*Not In My Back Yard*), y es necesario gestionarlo de forma adecuada. Una especie de efecto contrario es el de los directamente más afectados por unas instalaciones que buena parte de la sociedad no quiere, pero que los más cercanos aceptan y apoyan por los beneficios económicos y sociales que esa instalación les aporta. Esto sucede, por ejemplo, en el caso de centrales eléctricas, instalaciones de almacenamiento nuclear, etc.

En lo que respecta a la gobernanza, su cometido es establecer marcos que favorezcan la seguridad energética como elemento fundamental del desarrollo sostenible, estableciendo legislación que favorezca el cumplimiento de los compromisos ambientales e incluyendo estos factores en las diferentes planificaciones sectoriales y en los desarrollos urbanísticos. También es fundamental que el gobierno favorezca la implicación de la sociedad en la consecución de los objetivos yendo más allá incluso de

lo que legalmente es preceptivo mediante la suscripción de convenios con los diferentes agentes implicados recogiendo y teniendo en cuenta las conclusiones y recomendaciones de entidades sectoriales en el ámbito de la energía y el clima.

La seguridad natural o medioambiental es un concepto directamente relacionado con la energía en diferentes aspectos y está íntimamente relacionada con el desarrollo ambiental: como se extraen los recursos necesarios para la producción energética, las tecnologías de producción y transporte o distribución y los efectos de la propia utilización de la energía. Estos aspectos están asociados a las actividades energéticas normales. Otro aspecto ambiental, quizá menos lesivo en lo que se refiere a las consecuencias es el impacto paisajístico y visual de las infraestructuras energéticas. Además es necesario tener en cuenta los accidentes ambientales derivados de estas actividades (Figura 27).



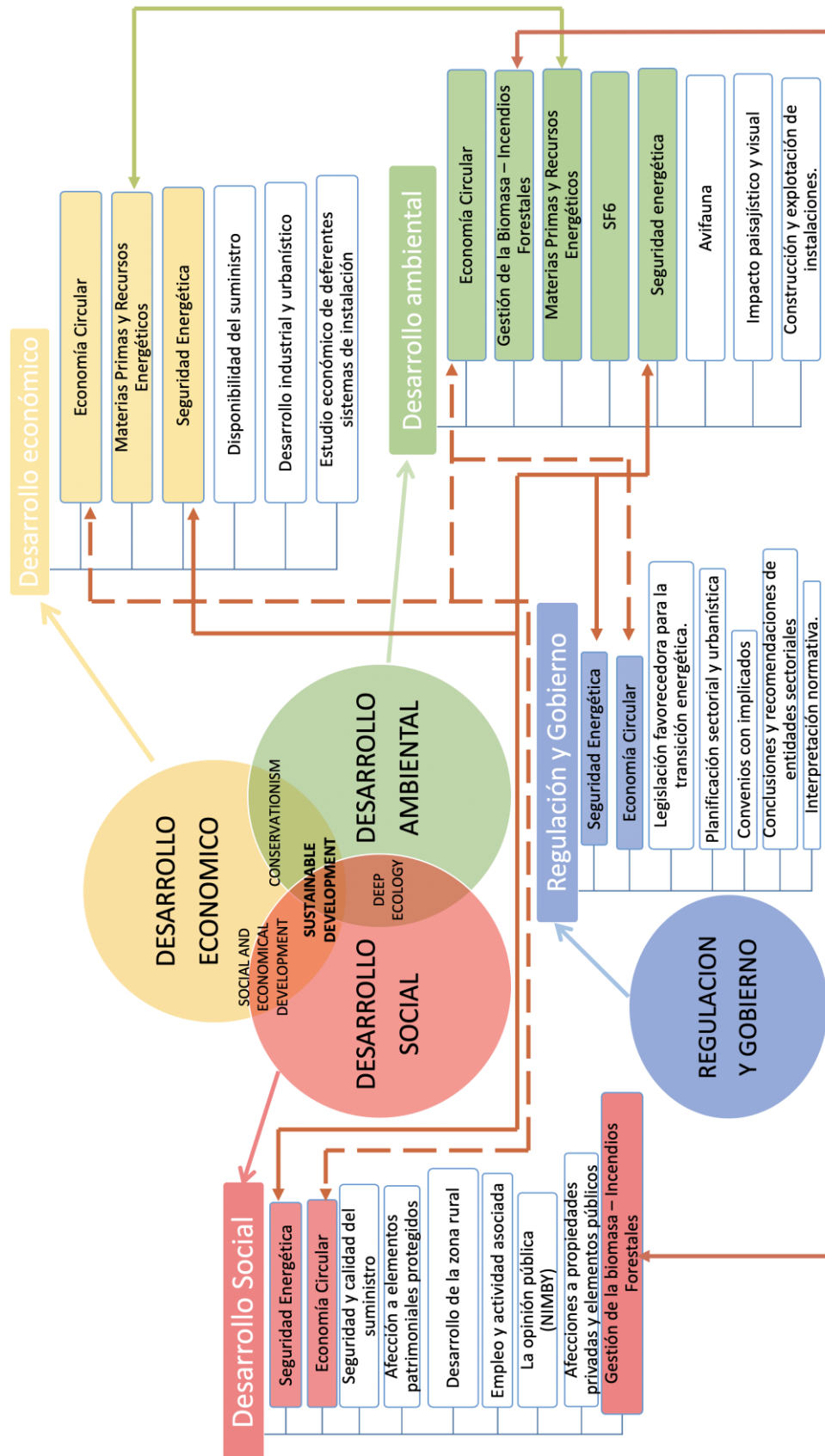


Figura 27: Elementos de sostenibilidad en el sector energético (elaboración propia)



3. LA DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD

3.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de trabajar hacia el establecimiento de un mercado energético interno europeo único se aprobó la Directiva 96/92 CE. La implementación de esta directiva en España se hizo mediante la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico. Aunque posteriormente se produjeron modificaciones de estas normas (Directiva 2003/54/CE y su adaptación a la legislación española mediante la Ley 17/2007, y la última normativa reguladora del Sector, la Ley 24/2013 del Sector Eléctrico) la estructura actual del Sector Eléctrico español es el resultado de la aplicación de la Ley 54/1997. Para iniciar la desregulación de buena parte del Sector Eléctrico esta ley lo dividió en cuatro actividades: Producción, Transporte, Distribución y Comercialización, cada una de ellas sería realizada por empresas diferentes, aunque podrían pertenecer a un mismo grupo empresarial. De ellas, la Producción y la Comercialización se liberalizaron mientras que el Transporte y la Distribución permanecieron reguladas. La liberalización de la Producción se ha caracterizado por la implantación simultánea y no suficientemente coordinada de diferentes tipos de instalaciones de difícil convivencia, sobre todo durante períodos bajos del ciclo económico: por un lado la necesaria implantación de producción a partir de fuentes renovables y la mejora de la eficiencia energética en la industria conseguida a partir de instalaciones de cogeneración (lo que hasta la entrada en vigor de la Ley 24/2013 se conocía como Régimen Especial) y la producción convencional (con características novedosas) mediante la construcción de grandes instalaciones de ciclo combinado. En el primer caso, la producción de las instalaciones, disfrutaban de prioridad de acceso a la red y su retribución se completaba con primas, pero el nivel de producción no está asegurado y está afectado por condiciones ambientales, fundamentalmente la disponibilidad de agua y viento. En el segundo caso se trata de instalaciones necesarias porque constituyen la base de la seguridad del suministro ya que no dependen de las condiciones ambientales (esta necesidad de seguridad del suministro se reconoce en el Tratado de Lisboa (2007) así como en el conocido como Tercer Paquete Energético de la UE publicado en 2009). Se trata de instalaciones de grandes dimensiones y de coste elevado, que en la actualidad se encuentran infrutilizadas, amenazadas por cierre o “hibernación”.

En lo que respecta a la liberalización de la Comercialización, esta se ha visto lastrada por el mantenimiento de la Tarifa de Último Recurso que, a pesar de su nombre, es la que utilizan la mayoría de los usuarios domésticos. Esta situación no parece que vaya a cambiar en el medio plazo. A partir de la intensa actividad normativa en el sector que tuvo lugar en 2013, está en vigor en sustitución de la Tarifa de Último Recurso, desde el 1 de enero de 2014, el Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC) que pretende relacionar la parte regulada del recibo al precio horario de la electricidad en el mercado. En cuanto a las actividades de Transporte y Distribución, sus ingresos proceden fundamentalmente de la retribución fijada por la Administración. Esta retribución procede de la parte regulada del importe del suministro eléctrico (tarifa de acceso o peajes). Lo descrito hasta ahora refleja la difícil situación del sistema eléctrico ya que tiene importantes problemas de sostenibilidad económica. En este sentido se ha desarrollado la Ley del Sector Eléctrico (Ley 24/2013) muy centrada en los aspectos retributivos de las diferentes actividades que generó gran inquietud en el sector al

establecer una retribución para la parte regulada que las empresas distribuidoras entendían como de difícil encaje, así como sensación de inseguridad jurídica en lo que antes de esta norma se denominaba régimen especial, sin que aparentemente resolviera la situación de la generación convencional. Todo ello además de una intensísima actividad regulatoria en los últimos años que ha generado mucha inestabilidad. Pese a los recelos iniciales, la parte regulada de la actividad finalmente pudo adaptarse al nuevo marco regulatorio en materia de retribución, pero ya se prevén nuevos ajustes retributivos en el nuevo período regulatorio que comenzará el 1 de enero de 2020. En este sentido, la Comisión Nacional de los Mercados de la Competencia considera necesaria revisar la tasa de retribución de la distribución de energía eléctrica debido a la bajada de los costes de la actividad [147]. Este es un ejemplo muy claro de los efectos de la gobernanza sobre la sostenibilidad del sistema eléctrico.

En otro orden de cosas, la actividad de Distribución, debido a las características de las instalaciones asociadas tiene un gran impacto en el entorno. En el caso de las líneas de distribución aéreas suponen una carga muy importante para el suelo que ocupan de cara al uso que se le puede dar, tanto en lo que respecta a la construcción como en el aprovechamiento forestal. También tienen un elevado coste de mantenimiento e importante riesgo ambiental en forma de incendios a su paso por zonas forestales, afecciones a espacios naturales protegidos (Red Natura, Reservas de la Biosfera, ZEPA, etc.), efectos sobre la avifauna, etc. En el caso de las líneas de distribución subterráneas buena parte de los problemas citados para las aéreas quedarían resueltos, pero el coste de instalación es de mucho más alto a desproporcionado en función de las condiciones de instalación respecto a las primeras, y aun así se pueden tener también un impacto significativo en el entorno, por ejemplo, en el caso de afectaciones a cauces, zonas arqueológicas, etc. En el caso de otros elementos de la red de distribución como son los transformadores se han desarrollado nuevas tecnologías en los que respecta a los dieléctricos utilizados en su construcción cuyo impacto en su implantación en la red de distribución debe ser evaluado.

En lo que respecta al diseño de la red de distribución, este se basa actualmente en el trasvase de la energía desde la producción a los puntos de consumo. La introducción de producción eléctrica directamente en la red de distribución (denominada como generación distribuida) afecta a la dirección de la transmisión del flujo de energía transmitida a través de la red, por lo que, si se generaliza este tipo de producción, será necesario establecer mecanismos de gestión de la red que tengan en cuenta estas nuevas situaciones. En definitiva, más allá de la propia red es necesario considerar la introducción de producción de mediano y pequeño tamaño directamente en la red de distribución. Otro aspecto relacionado con la gestión de la red son las posibilidades que las tecnologías de la información y la comunicación proporcionarán a corto plazo a los usuarios para la gestión de sus necesidades de suministro lo que se ve favorecido por las recientes modificaciones realizadas por el Gobierno relacionadas con la facturación eléctrica, incluso a precios reales en cada hora para los usuarios para los que tecnológicamente es posible (contadores inteligentes). El ya descrito Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor, permite la facturación a precio horario real del mercado para aquellos usuarios que dispongan de equipos de medida de última generación. Para los demás este precio es fijado por Red Eléctrica de España, que es la entidad gestora del Transporte de electricidad en España.

3.2. LA ACTIVIDAD DE DISTRIBUCIÓN

La actividad de distribución de energía eléctrica es aquella que tiene por objeto la transmisión de energía eléctrica desde las redes de transporte, o en su caso desde otras redes de distribución o desde la generación conectada a la propia red de distribución, hasta

los puntos de consumo u otras redes de distribución en las adecuadas condiciones de calidad con el fin de suministrarla a los consumidores. Se trata de una actividad regulada y la principal normativa que regula su funcionamiento se indica en la Tabla 13.

Tabla 13: Normativa regulatoria de la actividad de distribución (elaboración propia)

Ley 24/2013	Ley del Sector Eléctrico. Ley que sustituye a la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico.
RD 1955/2000	RD por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
RD 1454/2005	Por el que se modifican determinadas disposiciones relativas al sector eléctrico. Modifica el RD 1955/2000.
RD 1634/2006	Por el que se establece la tarifa eléctrica a partir del 1 de enero de 2007. Modifica el RD 1955/2000.
Orden IET/2660/2015	Establecimiento de Costes Unitarios para la actividad de distribución, definiciones de crecimiento vegetativo y aumento relevante de potencia y compensaciones por uso y reserva de locales.
RDL 15/2018	De medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.

Además de esta normativa, existe normativa adicional relacionada con la retribución de la distribución y normativa técnica de las instalaciones que se citará más adelante. La actividad de distribución es realizada por empresas distribuidoras que realizan su actividad en un territorio concreto que se denomina zona de distribución. La mayor parte de esta actividad es realizada por cinco grandes empresas que están agrupadas en la patronal eléctrica UNESA que en septiembre de 2018 se transforma en AELEC (Asociación de Empresas de Energía Eléctrica) y destacan el papel crucial de la distribución y los esfuerzos necesarios para la transición energética.

Hay además más de 300 pequeñas empresas que desarrollan su actividad a nivel local (Tabla 14) [148].

Tabla 14: Distribución por provincias de empresas de distribución eléctrica
Elaboración propia a partir de [148]

PROVINCIA	NUMERO DE EMPRESAS	PROVINCIA	NUMERO DE EMPRESAS	PROVINCIA	NUMERO DE EMPRESAS
LLEIDA	19	MADRID	10	LUGO	3
VALENCIA - VALÈNCIA	19	CASTELLÓN - CASTELLÓ	9	MÁLAGA	3
CORUÑA (A)	18	CÁCERES	8	BALEARS (ILLES)	2
HUESCA	18	NAVARRA	7	GUADALAJARA	2
ALICANTE - ALACANT	16	SALAMANCA	7	HUELVA	2
BADAJOS	15	VALLADOLID	7	MURCIA	2
ALBACETE	14	BURGOS	5	RIOJA (LA)	2
CÓRDOBA	14	CIUDAD REAL	5	SEGOVIA	2
BARCELONA	13	JAÉN	5	TARRAGONA	2
GIRONA	12	ÁVILA	4	ARABA/ÁLAVA	1
GRANADA	12	CANTABRIA	4	CEUTA	1
PONTEVEDRA	12	CUENCA	4	MELILLA	1
SEVILLA	12	OURENSE	4	SANTA CRUZ TENERIFE	1
ALMERÍA	11	ASTURIAS	3	TERUEL	1
LEÓN	11	BIZKAIA	3	ZARAGOZA	1
CÁDIZ	10	GIPUZKOA	3	TOTAL	340

En particular, en el ámbito de la C.A. de Galicia las empresas que desarrollan esta actividad son las relacionadas en la Tabla 15:

Tabla 15: Empresas de distribución eléctrica en Galicia
Elaboración propia a partir de [148]

ORGANIZACION	MUNICIPIO	PROVINCIA
BARRAS ELECTRICAS GALAICO-ASTURIANAS S.A. (BEGASA)	Lugo	LUGO
CENTRAL ELECTRICA INDUSTRIAL, S.L.	Val do Dubra	CORUÑA (A)
CENTRAL ELECTRICA SESTELO Y CIA, S.A.	Ponteareas	PONTEVEDRA
COMPAÑIA DE ELECTRIFICACION, S.L.	Vilagarcía de Arousa	PONTEVEDRA
DISTRIBUIDORA ELECTRICA DE CATOIRA, S.A.	Catoira	PONTEVEDRA
DISTRIBUIDORA ELECTRICA DE MELON, S.L.	Vigo	PONTEVEDRA
DISTRIBUIDORA ELECTRICA NIEBLA, S.L.	Coruña (A)	CORUÑA (A)
ELECTRA ALTO MIÑO, S.A.	Salvaterra de Miño	PONTEVEDRA
ELECTRA CUNTIENSE, S.L.	Cuntis	PONTEVEDRA
ELECTRA DE CABALAR, S.L.	Capela (A)	CORUÑA (A)
ELECTRA DE JALLAS, S.A.	Cee	CORUÑA (A)
ELECTRA DE SANTA COMBA, S.L.	Santa Comba	CORUÑA (A)
ELECTRA DE ZAS, S.L.	Zas	CORUÑA (A)
ELECTRA DEL GAYOSO, S.L.	Vimianzo	CORUÑA (A)
ELECTRA DEL NARAHIO, S.A.	Betanzos	CORUÑA (A)
ELECTRA DO FOXO, S.L.	Vimianzo	CORUÑA (A)
ELECTRICA DE ALBERGUERIA, S.A.	Ourense	OURENSE
ELECTRICA DE BARCIADEMERA, S.L.	Covelo	PONTEVEDRA
ELECTRICA DE CABAÑAS, S.L.	Cabanas	CORUÑA (A)
ELECTRICA DE CANTOÑA, S.L.	Paderne de Allariz	OURENSE
ELECTRICA DE CASTRO CALDELAS, S.L.	Coruña (A)	CORUÑA (A)
ELECTRICA DE GRES, S.L.	Boqueixón	CORUÑA (A)
ELECTRICA DE MOSCOSO, S.L.	Lama (A)	PONTEVEDRA
ELECTRICA DE VALDRIZ, S.L.	Oleiros	CORUÑA (A)
ELECTRICA DE VER, S.L.	Bóveda	LUGO
ELECTRICA LOS MOLINOS, S.L.	Ponte Caldelas	PONTEVEDRA
ELECTRO MANZANEDA, S.L.	Ourense	OURENSE
FUCIÑOS RIVAS, S.L.	Melide	CORUÑA (A)
HIDROELECTRICA DE LARACHA, S.L.	Coruña (A)	CORUÑA (A)
HIDROELECTRICA DE SILLEDA, S.L.	Silleda	PONTEVEDRA
HIDROELECTRICA DEL ARNEGO, S.L.	Agolada	PONTEVEDRA
HIDROELECTRICA JOSE MATANZA GARCIA, S.L.	Carballedo	LUGO
INDUSTRIAL BARCALESA, S.L.	Baña (A)	CORUÑA (A)
SAN MIGUEL 2000 DISTRIBUCION, S.L.	Ourense	OURENSE
SOCIEDAD ELECTRICISTA DE TUY, S.A.	Tui	PONTEVEDRA
SUCESORES DE MANUEL LEIRA, S.L.	Cabanas	CORUÑA (A)
UNION DE DISTRIBUIDORES DE ELECTRICIDAD, S.A. (UDES)	Santiago de Compostela	CORUÑA (A)
UNION FENOSA DISTRIBUCION, S.A.	Madrid	MADRID

Además de estas, en Galicia hay pequeñas áreas de distribución de Viesgo en Lugo e Iberdrola en Ourense.

La cuota de cada una de estas empresas en Galicia es la indicada en la Tabla 16.

Tabla 16: Cuota de distribución en Galicia
Elaboración propia a partir de [149]

EMPRESA	CUOTA	USUARIOS
UFD	85,11%	1.279.865
BARRAS ELECTRICAS GALAICO-ASTURIANAS S.A. (BEGASA)	9,34%	140.412
APYDE	5,53%	83.187
OTROS	0,02%	259

Ya sea en el ámbito regulado o en el liberalizado las diferentes actividades son desarrolladas por empresas privadas que por lo tanto necesitan disponer de rentabilidad suficiente para mantenerse en el mercado, es decir, para garantizar su sostenibilidad económica. En el caso de las empresas distribuidoras sus ingresos fundamentales provienen de la retribución de la actividad fijada por el gobierno. El problema surgido en la última década ha sido la acumulación anual de desequilibrios entre los costes reconocidos del sistema eléctrico y los ingresos. Esto generó lo que se ha denominado déficit de tarifa que en 2013 se estimaba en 4.100 millones de euros y se han acumulado 40.000 millones de euros entre el año 2000 y el 2013. Para atajar este déficit, las diferentes administraciones han desarrollado legislación, en los dos últimos años, muy intensa que, aunque inicialmente introdujo una fuerte inestabilidad en el sector eléctrico, ha conseguido reducir el déficit acumulado a 23.000 millones de euros a finales de 2016, después de los superávits obtenidos a partir de 2014. La metodología de retribución vigente de la distribución se basa en baremos de costes unitarios de instalaciones mediante los cuales se retribuye a las distribuidoras [150], de forma que a medida en que estas se alejan en mayor o menor medida del valor de baremo aumenta o disminuye el beneficio por retribución. La vigencia de esta norma se estableció en cinco años, en los que se debería fijar un nuevo marco regulatorio que, después de la entrada en vigor del Real Decreto Legislativo 1/2019 del 11 de enero, sería competencia de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia la elaboración del nuevo marco. En la Tabla 17 se describen los principales cambios legislativos en materia de retribución introducidos.

Tabla 17: Evolución normativa de la retribución de la actividad de distribución (elaboración propia)

Norma	Cambios que introduce
RD 2819/1998	Reparto de “bolsa” entre empresas. La “bolsa” se incrementaba anualmente en función del IPC y otros factores asociados al aumento de la demanda y mejora de la eficiencia. No se tienen en cuenta aspectos como mejoras en la calidad, disminución de pérdidas en la red, etc.
RD 222/2008	Retribución fijada anualmente por el M. de Industria. Se tenían en cuenta los Planes de Inversión, resultados del modelo de red de referencia y la contabilidad regulatoria de costes (costes y gastos incurridos anualmente por las empresas distribuidoras asociados a determinados centros de coste). Se fijaba al inicio de cada período regulatorio (4 años) y se actualizaba con el IPC y con incentivos de calidad y pérdidas (3% y 2%). Estos incentivos no consolidaban.
RDL 6/2009	Establecimiento de límites máximos de déficit para los años 2010, 2011 y 2012. Objetivo de no aparición de nuevo déficit a partir de 2013.
RDL 14/2010	Se elevan los límites máximos de déficit establecido en el RDL 6/2009 para los años 2010, 2011 y 2012 y se mantiene el objetivo de no aparición de nuevo déficit a partir de 2013. Limitación de horas equivalentes primadas de funcionamiento de las instalaciones fotovoltaicas. Obligación para los productores al pago de un peaje de generación debido a la su incidencia en las redes de transporte y distribución.

Norma	Cambios que introduce
RDL 1/2012 (27 de enero)	Supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.
RDL 13/2012 (30 de marzo)	Se fijan nuevos criterios para las actividades de transporte y distribución. Se disminuyen las cantidades para las empresas generadoras en concepto de garantía de potencia. Se corrige la retribución de la generación en los sistemas insulares y extrapeninsulares vinculando el pago por garantía de potencia a la disponibilidad real de las plantas. En distribución se retribuyen activos no amortizados en base al valor neto de los mismos. También se modifica la retribución en los dos años siguientes para las instalaciones puestas en servicio a partir de enero de 2012.
RDL 20/2012 (13 de julio)	Se modifica la retribución de la actividad de transporte de forma que la retribución por inversión se reconocerá para activos no amortizados en base al valor neto de los mismos.
RDL 29/2012 (28 de diciembre)	Posibilidad de que los desajustes temporales de liquidaciones del sistema eléctrico en 2012 generen derechos de cobro que puedan ser cedidos al Fondo de Titulización del Déficit del Sistema Eléctrico. Supresión o corrección del régimen económico primado en caso del incumplimiento de las obligaciones de ejecución de la instalación en un concreto plazo para el régimen especial.
Ley 15/2012 (27 de diciembre)	Medidas de carácter excepcional para que los costes del sistema pudiesen ser financiados con partidas de los Presupuestos Generales del Estado, además de por los ingresos normales (peajes de acceso y demás ingresos regulados).
Ley 17/2012 (27 de diciembre)	Eliminación de limitaciones a avales (exclusivamente para el año 2013) del Fondo de Titulización del Déficit del Sistema Eléctrico.
RDL 2/2013 (1 de febrero)	Modificación del índice de actualización de los costes del sistema eléctrico. Introducción de dos opciones de venta de energía producida en instalaciones de régimen especial (renovables, cogeneración y residuos): mediante tarifa regulada o venta en el mercado libre sin complemento de prima.
Ley 15/2013 (17 de octubre)	Financiación para el año 2013 de determinados costes del sistema eléctrico con cargo a los Presupuestos Generales del Estado ocasionados por los incentivos económicos para el fomento a la producción a partir de fuentes renovables.
RDL 9/2013 (12 de julio)	Para la retribución de las actividades de transporte y distribución se tienen en cuenta los costes necesarios para realizar dichas actividades por parte de una empresa eficiente y bien gestionada y considera la actividad como de bajo riesgo. Se indexa la retribución a las Obligaciones del Estado a diez años aplicando el diferencial adecuado (concepto de rentabilidad razonable).
Ley 24/2013 (26 de diciembre)	Medidas sobre las actividades destinadas al suministro de energía eléctrica. Desaparece el régimen especial y se establecen cambios para la retribución de las nuevas instalaciones. Establecimiento de períodos regulatorios de 6 años en los que se podrán modificar todos los parámetros retributivos y semiperíodos de 3 años en los que se revisan los relacionados con las estimaciones de mercado.
RD 1047/2013 y RD 1048/2013	Necesidad de aprobación por la Administración de los Planes de Inversión. Costes Unitarios (propuesta de la CNMC de fecha 26/06/2014). Retribución del fraude detectado.
RD 413/2014 y Orden IET/1045/2014	Desarrollo de la metodología retributiva de la producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos: Retribución basada en la venta de energía a precio de mercado, teniendo en cuenta componentes de inversión y de operación. Para las nuevas instalaciones se establece el procedimiento de concurrencia competitiva. No se retribuyen costes o inversiones derivados de normas que no sean de aplicación en todo el territorio español o aquellos que no estén exclusivamente relacionados con la producción de energía eléctrica. La retribución específica se deja de percibir cuando las instalaciones superen la vida útil regulatoria.
ORDEN IET/2660/2015	Se aprueban las instalaciones tipo y los valores unitarios de referencia de inversión, de operación y mantenimiento por elemento de inmovilizado y los valores unitarios de retribución de otras tareas reguladas que se emplearán en el cálculo de la retribución de las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

Norma	Cambios que introduce
RDL 15/2018	De medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores.
RDL 1/2019 (11/01/2019)	Establece la competencia de la CNMC para aprobar diferentes metodologías en los sectores eléctricos y del gas natural.
RD 244/2019	Por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.
CIR/DE/010/19	Proyecto de Circular de la CNMC por la que se establecen las metodologías que regulan el funcionamiento del mercado mayorista de electricidad y de la gestión de la operación del sistema
CIR/DE/012/19	Proyecto de Circular de la CNMC por la que se establece la metodología de retribución del operador del sistema eléctrico.
CIR/DE/011/19	Proyecto de Circular de la CNMC por el que se establece la metodología de cálculo de la tasa de retribución financiera de las actividades de transporte y distribución de energía eléctrica, y regasificación, transporte y distribución de gas natural.
CIR/DE/008/19	Proyecto de Circular de la CNMC por la que se establece la metodología para el cálculo de la retribución de la actividad de transporte de energía eléctrica.
CIR/DE/009/19	Proyecto de Circular de la CNMC por la que se establece la metodología para el cálculo de la retribución de la actividad de distribución de energía eléctrica
CIR/DE/014/19	Proyecto de Circular de la CNMC por la que se aprueban instalaciones tipo y los valores unitarios de referencia de operación y mantenimiento por elemento de inmovilizado para instalaciones de transporte de energía eléctrica.

En lo que respecta a los costes de la actividad en Galicia existen ciertas peculiaridades que hacen que estos sean superiores al resto de España:

- Alta dispersión de la población, por la que los valores de longitud de las redes por usuario sean muy altos y se suministren a pocos clientes por centro de transformación, lo que incrementa los costes de construcción y mantenimiento.
- Gran fragmentación de la propiedad de los terrenos, lo que dificulta la obtención de permisos de paso e incrementa los costes en las expropiaciones e incluso sea necesario modificar los proyectos hacia soluciones más costosas.
- Orografía muy compleja que en muchos casos impide trazados rectos lo que ocasiona una mayor longitud del trazado.
- Muchas zonas con grandes áreas de masa forestal, lo que incrementa el coste de las expropiaciones e incrementa el mantenimiento por las averías causadas por el arbolado.

3.3. EL SISTEMA ELÉCTRICO

3.3.1. Evolución del sistema eléctrico

Inicialmente, a finales del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX, el sistema eléctrico estaba formado por instalaciones de producción de pequeño tamaño situadas en las proximidades de los puntos de consumo. Esto era posible debido a la baja demanda de suministro debido, tanto al número de suministros existentes como a la escasa potencia instalada en cada uno de ellos. Sin embargo, a medida que el uso de la energía eléctrica se fue asentando en la sociedad se produjeron incrementos muy significativos en la demanda de energía que se puede resumir según lo indicado en la Tabla 18.

Tabla 18: Incremento de la demanda durante la generalización del uso de la energía eléctrica [151]

Periodo	Incremento medio anual de la demanda	Información de interés
1935	4,3%	
1940-1955	8,5%	Reconstrucción de la posguerra. Inicios de la industrialización.
1955-1960	10%	
1960-1973	12%	

Con estos incrementos medios anuales de la demanda las instalaciones de producción no eran suficientes y surgió la necesidad de nuevas instalaciones de gran tamaño, que disminuyeran los costes por potencia eléctrica generada. Estas instalaciones estarían situadas en mayor o menor medida alejadas de los puntos de consumo, en unos casos por necesidad técnica de ubicación junto a la fuente de energía primaria, como en el caso de las grandes centrales hidráulicas, y en otros en los que, aunque la necesidad técnica no existía, la disminución de costes en el transporte del combustible aconsejaba su ubicación en las proximidades de las áreas en donde se extraía el combustible. Este era el caso de las grandes centrales térmicas de carbón situadas junto a las minas de donde este era extraído. En los últimos años muchas de estas centrales térmicas de carbón se han transformado en centrales de ciclo combinado usando el gas natural como combustible. Por último, otros tipos de centrales tenían más flexibilidad para su ubicación, pero aun así están bastante alejadas de los puntos de consumo. Este es el caso de centrales de fuel o nucleares. En la actualidad, debido al desarrollo en los últimos años de instalaciones de producción de mediano y pequeño tamaño tanto con tecnologías renovables como de cogeneración, la producción de electricidad se encuentra en una situación mixta, con grandes instalaciones de producción situadas lejos de los puntos de consumo y medianas y pequeñas producciones próximas a estos puntos en lo que se ha venido a denominar generación distribuida (Figura 28).

La variación anual de la demanda eléctrica se ha considerado tradicionalmente un indicador de la situación económica (Tabla 19 y Figura 29).



Figura 28: Evolución en el tiempo del sistema eléctrico (elaboración propia)

Tabla 19: Incremento anual de la demanda. Elaboración propia a partir de [152], [153]

Año	Δ (%)	Año	Δ (%)	Año	Δ (%)
1960	8,4	1980	4,6	2000	5,9
1961	11,6	1981	1,3	2001	5,8
1962	12,0	1982	0,4	2002	3,1
1963	9,9	1983	4,7	2003	7,1
1964	11,9	1984	4,7	2004	4,8
1965	11,8	1985	2,9	2005	4,5
1966	14,2	1986	2,2	2006	3,0
1967	11,7	1987	3,8	2007	2,8
1968	13,0	1988	4,4	2008	0,3
1969	13,3	1989	7,2	2009	-5,8

Año	Δ (%)	Año	Δ (%)	Año	Δ (%)
1970	10,4	1990	3,0	2010	1,4
1971	7,3	1991	6,9	2011	-3,1
1972	12,6	1992	1,2	2012	-1,1
1973	12,6	1993	0,1	2013	-2,3
1974	8,4	1994	3,7	2014	-1,1
1975	3,6	1995	3,6	2015	2,0
1976	8,2	1996	3,1	2016	0,7
1977	4,2	1997	4,8	2017	1,1
1978	5,5	1998	7,4	2018	0,4
1979	6,8	1999	7,0		

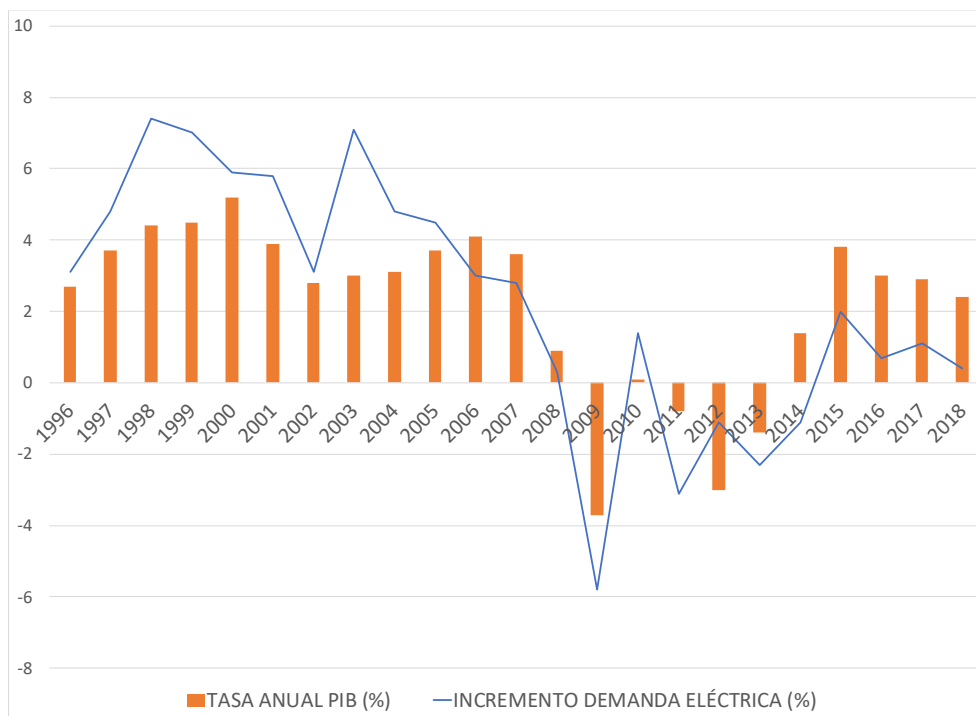


Figura 29: Variación anual de la demanda eléctrica vs PIB anual
Elaboración propia a partir de [153], [154]

3.3.2. Necesidad de diferentes niveles de tensión

La ubicación de la producción alejada de los puntos de consumo implica la necesidad de establecer diferentes niveles de tensión a lo largo del sistema eléctrico. Es necesario disminuir la intensidad de corriente a transportar, tanto para reducir la sección de los conductores necesaria y permitir instalaciones físicamente viables como para reducir las pérdidas en los conductores. Estos conductores, tanto por sus características físicas como por la forma en la que están instalados tienen una impedancia que hace que se comporten a su vez como un receptor dentro del sistema, es decir, van a consumir energía eléctrica. Por un lado, esta energía consumida por los conductores no va a estar disponible para los consumidores y por otro lado la impedancia del conductor va a producir una caída de tensión al final de la línea. La impedancia tiene un componente resistivo que depende de las características constructivas del conductor y un componente reactivo que depende tanto de las características constructivas como de la forma en la que están instalados. En este sentido, en las líneas aéreas en la reactancia predomina el carácter inductivo, en la que tiene gran importancia las diferentes disposiciones en que se pueden situar los cables, mientras que en las subterráneas predomina el carácter capacitivo debido a los diferentes

elementos constitutivos del cable (conductor, capas semiconductoras, aislamiento, pantalla, cubierta). La impedancia puede expresarse por la siguiente expresión compleja:

$$\vec{Z} = R + jX \quad (\text{Ec. 6})$$

Las pérdidas de energía vendrán dadas por la potencia aparente consumida por el conductor:

$$\vec{S} = \vec{Z} \cdot I^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

En particular, las pérdidas de potencia debido al efecto Joule por la parte resistiva de la impedancia serán:

$$\Delta P = 3RI^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde: Z = Impedancia en ohmios, R = Resistencia en ohmios, X = Reactancia en ohmios, S = Potencia aparente en Vas, I = Intensidad en amperios, P = Potencia en watos.

Por lo tanto, para una impedancia dada, para reducir las pérdidas de potencia es necesario reducir la intensidad de corriente ya que es aumenta con esta de forma cuadrática.

La relación entre la potencia y la intensidad también se puede escribir como:

$$S = U \cdot I \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde: S = Potencia a transportar en VAs, U = Tensión en voltios.

Por lo que, para una potencia a transportar S dada, si aumentamos la tensión U, la intensidad disminuye y con ella tanto la sección del conductor necesaria como las pérdidas en el conductor.

Por otro lado, la caída de tensión que se produce en los conductores debido a su impedancia viene dada por:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi) \cdot L \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde: φ = Angulo de fase, L = Longitud de la línea.

Como vemos, la caída de tensión es directamente proporcional a la intensidad, por lo que al igual que veíamos con las pérdidas de potencia para reducirla es necesario bajar en lo posible su valor aumentando la tensión de alimentación. En distancias grandes la caída de tensión que se produce excede los valores reglamentarios, fijados en el 7% por el RD 1955/2000 por lo que en la distribución eléctrica existe la necesidad del establecimiento de diferentes niveles de tensión a lo largo del sistema eléctrico conformándolo en diferentes subsistemas (Tabla 20 y Figura 30).

Tabla 20: Valores usuales en el sistema eléctrico (elaboración propia)

	Tensión
Generación/Producción	Muy variable.
Transporte	220 kV, 400 kV
Distribución Primaria	132 kV, 66 kV, 45 kV
Distribución Secundaria	20 kV, 10 kV
Distribución en Baja Tensión	Sistema 400/230 V

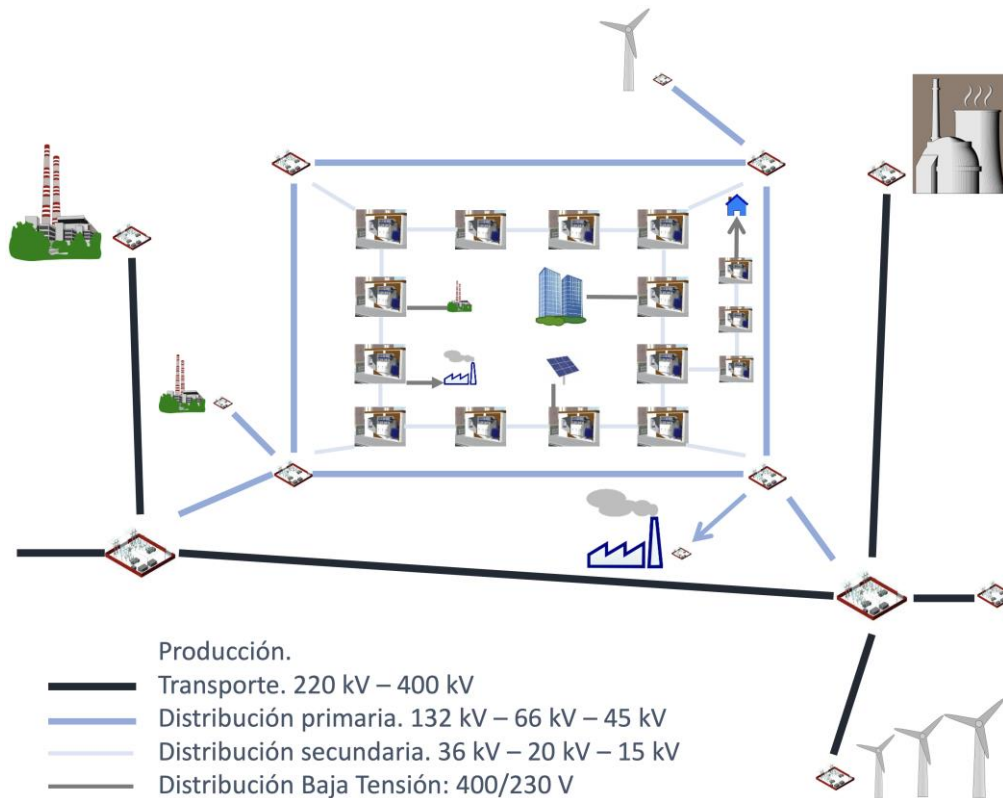


Figura 30: Representación esquemática del sistema eléctrico (elaboración propia)

Los cambios de tensión en el sistema eléctrico se realizan mediante máquinas eléctricas denominadas transformadores. Como el resto de las máquinas eléctricas, el funcionamiento de los transformadores se basa en la relación existente entre los campos magnéticos y la electricidad.

Por un lado, una corriente eléctrica genera en el entorno del conductor por el que circula un campo magnético (Ley de Biot-Savart) que aplicado al caso de una bobina viene dado por:

$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot I}{L} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\Phi = \int B \cdot dS \quad (\text{Ec. 12})$$

Por otro lado, un campo magnético variable genera en extremos de un conductor una fuerza electromotriz, que de acuerdo con la Ley de Faraday-Lenz viene dado por:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde: B = Intensidad de campo magnético, μ = Permeabilidad magnética, I = Intensidad, L = Longitud de la bobina, n = Número de espiras, S = Superficie, Φ = Flujo magnético, e = Fuerza electromotriz, t = Tiempo.

De esta forma un transformador elemental consiste en un núcleo magnético al que se arrollan dos bobinas, un primario y un secundario. Al aplicar una tensión variable al primario y hacer circular por él una corriente se genera en su entorno un campo magnético también variable, cuyo flujo circula a través del núcleo magnético. Este campo magnético variable genera en los extremos del secundario una tensión. La diferencia entre la tensión aplicada al primario y la obtenida en extremos del secundario es proporcional a la relación de transformación, definida por la relación entre el número de espiras del primario y del secundario (Figura 31).

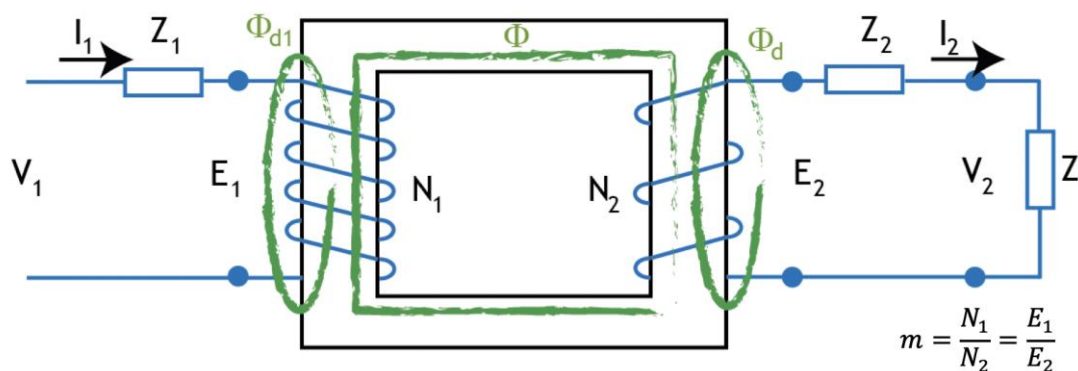


Figura 31: Funcionamiento del transformador (elaboración propia)



Fuente: Ormazabal

Figura 32: Descripción constructiva de transformador [155]

Los transformadores se sitúan en dos tipos de instalaciones: subestaciones y centros de transformación. En el caso de las subestaciones las dos tensiones, tanto la primaria como la secundaria están en valores considerados como de Alta Tensión (reglamentariamente tensiones superiores a 1 kV) y pueden ser reductoras o elevadoras en función de que aumenten o disminuyan la tensión en el sistema aguas abajo, mientras que en los centros de transformación la tensión primaria tiene valores de Alta Tensión y la tensión secundaria valores de Baja Tensión (tensión igual o inferior a 1 kV). De esta forma, y teniendo en cuenta los valores más usuales de tensiones utilizados indicados en

la Tabla 20, los cambios de tensión que tienen lugar en estas instalaciones son los indicados en la Tabla 21.

Tabla 21: Tensiones primarias y secundarias de transformadores (elaboración propia)

Instalación	Tensión Primaria	Tensión Secundaria
Subestación de Central	Generalmente mayor a 30 kV	Tensión de transporte: 220 kV, 400 kV
Subestación de transporte	220 kV, 400 kV	132 kV, 66 kV, 45 kV
Subestación de distribución	132 kV, 66 kV, 45 kV	20 kV, 15 kV, 10 kV
Centro de transformación	20 kV, 15 kV, 10 kV	Sistema 400/230 V

3.3.3. Elementos de la red de distribución

Consideraremos como partes de la red de distribución como aquellos elementos que tienen una función concreta dentro de la red. En este sentido tenemos:

- Subestaciones. Transformar tensión entre diferentes niveles de alta tensión.
- Líneas de distribución primaria. Son líneas de Alta Tensión que interconectan subestaciones.
- Líneas de distribución secundaria. Generalmente denominadas líneas de Media Tensión. Parten de las subestaciones e interconectan centros de transformación, distribución o seccionamiento.
- Centros de Transformación. Transforman la tensión de distribución secundaria a la tensión de utilización en Baja Tensión.
- Líneas de Baja Tensión. Parten de los Centros de Transformación y llevan la energía eléctrica hasta los puntos de consumo.

La disposición de estos elementos en la red de distribución se denomina topología de la red. Existen diferentes situaciones de las instalaciones en función de la topología de la red:

- Red anillada o en bucle: Los elementos de la red están alimentados desde dos o más puntos, que pueden ser dos o más líneas diferentes de la misma subestación, dos o más líneas de diferentes subestaciones y también hay casos de anillos dentro de una misma línea. Esta disposición es típica de los núcleos urbanos y de líneas principales. Desde el punto de vista de la gestión de la red de distribución es la situación ideal, ya que permite el aislamiento de instalaciones con averías sin afección a la red no averiada, así como a una fácil adecuación del servicio en caso de necesidad por variación en las condiciones de este. Al punto de la red donde confluyen las diferentes líneas alimentadoras se conoce como punto frontera.
- Red en antena: El tramo de red no dispone de alimentación alternativa. No es una situación ideal, ya que una avería en un punto de la red la deja fuera de servicio desde el elemento de protección inmediatamente anterior a la avería. Esta disposición es frecuente en derivaciones de líneas principales sin núcleos ni puntos importantes de suministro.

En cada uno de los elementos de la red tienen lugar intercambios energéticos que se detallan en la Figura 33.

1.1.1.1. Subestaciones

Son elementos de la red que transforman tensión entre niveles de Alta Tensión:

- De la tensión de producción a la tensión de transporte.
- Entre diferentes niveles de tensión de transporte (p.e. 230 kV/400 kV o viceversa).
- Entre la tensión de transporte a la tensión de distribución primaria (p.e. 400 kV/132 kV).
- Entre la tensión de distribución primaria a la tensión de distribución secundaria (p.e. 132 kV/20 kV)
- Entre diferentes niveles de tensión de distribución secundaria.

Para simplificar su descripción se utilizará una pequeña subestación de distribución que transforma la tensión de distribución primaria (132 kV) a la tensión de distribución secundaria o media tensión (20 kV).

Desde un punto de vista constructivo, este tipo de instalaciones tiene dos zonas muy diferenciadas: el parque de intemperie, correspondiente a la parte de alta tensión y la zona de media tensión que está instalada en el interior de un edificio. En el parque de intemperie se instalan los elementos de protección y maniobra tanto de las posiciones de línea (las diferentes líneas que llegan y parten de la subestación, puntos de conexiones de consumidores o productores a este nivel de tensión, ...).

En el montaje convencional de subestaciones, las posiciones de alta tensión consisten en una sucesión de apartamiento de maniobra y protección que depende de si se trata de posiciones de línea o de transformador.

En el lado de media tensión de la subestación se encuentran las posiciones correspondientes a las líneas de distribución que parten de la subestación. Además, existen otros elementos como equipos de protección y medida de dichas líneas.

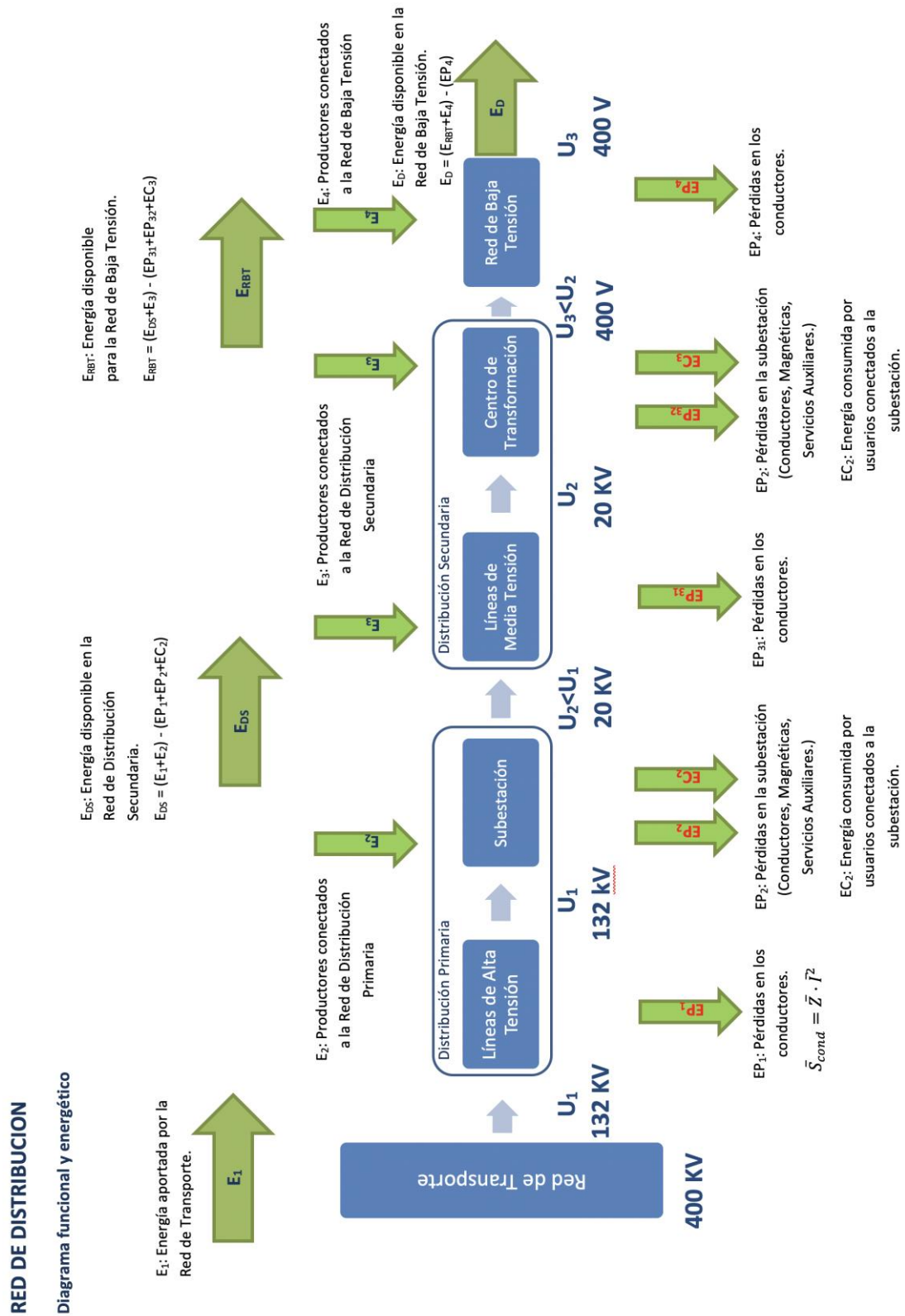


Figura 33: Diagrama funcional y energético de la red de distribución (elaboración propia)

3.3.3.1. Líneas aéreas

Las líneas de distribución aéreas transmiten la energía eléctrica por medio de cables desnudos o aislados sobre elementos de sustentación denominados apoyos. Las condiciones técnicas de proyecto y ejecución de estas instalaciones están reguladas en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión (RLAT).

El uso de cada tipo de cables y apoyos difiere bastante en función del nivel de tensión utilizado. En las líneas de distribución primaria (45 kV, 66 kV, 132 kV) los cables utilizados son desnudos y los apoyos están formados por estructuras metálicas. En el caso de la distribución secundaria (20 kV, 15 kV) los conductores utilizados son mayoritariamente desnudos, aunque en aplicaciones concretas y de potencia instalada muy limitada pueden utilizarse conductores aislados trenzados en haz. Esta limitación en el uso de conductores es debido a que constructivamente son, incluso con secciones pequeñas, muy voluminosos y pesados y con un coste muy elevado respecto a los conductores desnudos. Existen también conductores forrados, que consisten en conductores desnudos recubiertos, pero el recubrimiento no dispone de nivel de aislamiento. En cuanto a los apoyos utilizados son muy variados dependiendo del tamaño de la línea, desde apoyos de hormigón para las líneas más sencillas hasta diferentes tipos de apoyos metálicos en función de su tamaño. Los conductores desnudos se unen a los apoyos a través de elementos denominados aisladores. En el caso de la distribución en baja tensión (sistema 400/230 V) hace años que las líneas de nueva construcción se realizan con cables aislados trenzados en haz sobre apoyos de hormigón, aunque todavía quedan numerosas redes antiguas con conductores desnudos sobre apoyos tanto de hormigón como de madera.

Dado que el sistema eléctrico es trifásico, existe una terna de conductores por cada circuito (un conductor por fase).

Sobre un mismo apoyo pueden ir uno o varios circuitos de forma que se pueden disminuir las afecciones sobre el territorio, pero tienen el inconveniente de que posibles averías causadas por acciones mecánicas externas a la red, temporales, etc., pueden afectar a más ámbito de la red. Si por los apoyos se instala más de un circuito, hablaríamos de doble circuito, triple circuito, etc.

En función de la potencia a transportar puede ser necesaria la instalación de más de un cable por fase. Hablaríamos entonces de líneas dúplex (2 conductores por fase), tríplex (3 conductores por fase), etc.

Las líneas aéreas tienen una gran afección sobre el territorio por el que discurren y gravan de forma importante las parcelas, tanto en lo que se refiere a la construcción sobre las parcelas como a las limitaciones de plantación en áreas forestales, por lo que actualmente su construcción es bastante difícil y casi siempre sujetas a procesos de expropiación. Sin embargo, su coste de instalación es más bajo que las líneas subterráneas y es, casi siempre, la primera opción a considerar cuando aparece la necesidad de construcción de una línea.

Al contrario que con el coste de instalación, su coste de mantenimiento es elevado, sobre todo en zonas con grandes áreas de arbolado denso debido a los trabajos necesarios para la gestión de la biomasa. También en este tipo de zonas los daños causados por temporales generan elevados costes de reparación.

Los conductores utilizados en las líneas aéreas de distribución pueden ser desnudos o aislados.

Conductores desnudos

Tal y como ya se indicó, son los mayoritariamente utilizados en la construcción de líneas eléctricas aéreas de alta tensión. Generalmente se utilizan cables de aluminio-acero. Este tipo de cables combina la buena conductividad eléctrica del aluminio con la carga de rotura del acero. De esta forma este tipo de cables está constituido por un alma de acero sobre la que se dispone una o varias capas de alambres de aluminio, de forma que sea el alma de acero la que soporta la tracción mecánica.

Conductores aislados

Son los mayoritariamente utilizados en las líneas de distribución en Baja Tensión, así como de forma excepcional en líneas de Alta Tensión en líneas de tensión nominal igual o inferior a 30 kV. En Alta Tensión en general se usan en líneas de pequeña potencia a transportar, en situaciones donde las distancias reglamentarias a conductores desnudos no puedan ser respetadas, o en zonas muy ambientalmente muy agresivas con los conductores (paso por áreas de arbolado donde no sea posible la apertura de la franja de servidumbre, zonas de muy alta contaminación, ...) Los cables se disponen trenzados en haz sobre un cable fiador, que sostiene el haz y soporta la tracción mecánica del tendido.

Por el contrario, los conductores aislados son los mayoritariamente utilizados en las líneas aéreas de Baja Tensión. El material conductor de estos cables en líneas de distribución es normalmente aluminio. Al igual que los de Alta Tensión están trenzados en haz y en este caso como fiador puede actuar tanto un cable de acero, que en este caso no tiene función eléctrica, como el conductor neutro, que en este caso estaría fabricado en una aleación de aluminio con denominación comercial almelec, conseguida añadiendo al aluminio magnesio y silicio, con lo que se obtiene una carga de rotura que aproximadamente duplica la del aluminio, eso sí, aumentando la resistencia eléctrica en torno a un 20%.

Apoyos

Los apoyos son los elementos cuya función es sujetar y/o sustentar a los conductores de forma que estos queden a la altura reglamentaria en función de las diferentes situaciones existentes en el trazado de la línea (Figura 34). Los conductores al ser tendidos en los apoyos adquieren la forma de una catenaria cuya flecha, calculada según las condiciones reglamentarias, determinará la altura del apoyo. Sobre los apoyos se instalan crucetas cuya función es la de separar los conductores tanto del apoyo como entre sí en las distancias que el Reglamento de Líneas de Alta Tensión especifica en función de la tensión nominal de la línea. Los conductores se sujetan a las crucetas a través de aisladores cuyas características son función, tanto de la tensión nominal de la línea como de las condiciones ambientales en donde esta está situada.

Además de la altura, el otro parámetro que caracteriza el apoyo es el esfuerzo máximo que puede soportar. Para la elección del esfuerzo del apoyo se tiene en cuenta por un lado la carga de rotura de los conductores una vez aplicados los coeficientes de seguridad reglamentarios y por otro lado el resto de acciones mecánicas que le son transmitidas tanto a través de los conductores (el peso propio del conductor, sobrecargas de viento y/o hielo, efectos de rotura de conductores) como otras acciones transmitidas al apoyo por el peso propio de elementos instalados en él (crucetas, aparatos de maniobra, baterías de condensadores, pasos aéreos-subterráneos, armarios, ...)

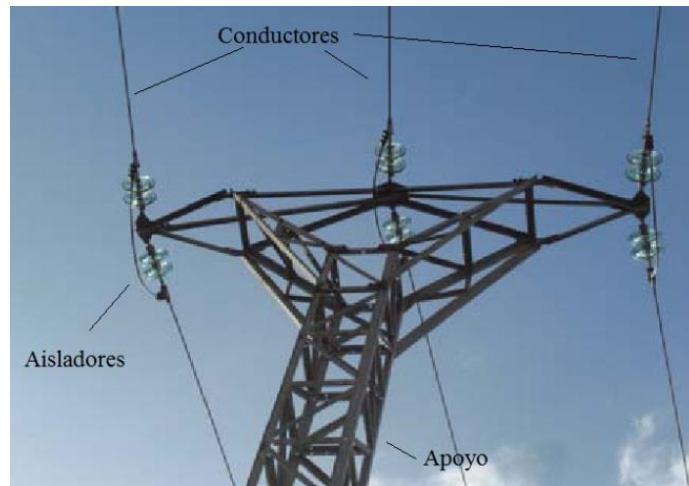


Figura 34: Apoyo de línea de media tensión (elaboración propia)

De acuerdo a su función en las líneas pueden ser (Figura 35):

- Apoyos de alineación (o suspensión): Su función es la de sustentar los conductores a la altura requerida, por lo que las únicas acciones mecánicas que estos ejercen sobre ellos son su propio peso y la acción del viento y/o hielo sobre los conductores.
- Apoyos de anclaje (o amarre): Son apoyos en los que el conductor está sujeto a ambos lados y tracciona al apoyo longitudinalmente. La tracción resultante depende de las diferencias existentes entre los dos vanos del apoyo, por lo que en el caso de que los dos vanos adyacentes al apoyo son idénticos la resultante sería nula.
- Apoyos de ángulo: Son apoyos en los que el trazado de la línea sufre un cambio de dirección. Siempre estarán sometidos a la tracción mecánica correspondiente a la resultante del ángulo.
- Apoyos de fin de línea: Estos apoyos están siempre sometidos a tracción mecánica longitudinal únicamente en uno de los lados.

Constructivamente los apoyos pueden ser de hormigón, metálicos o de madera (Figura 36).

A lo largo del tiempo tanto los apoyos de hormigón como los metálicos han tenido múltiples formas. En la actualidad se tiende a la unificación de los modelos de forma que los utilizados actualmente son:

- Apoyos de hormigón (Norma UNE 207016).
 - Apoyos de hormigón armado vibrado (HV). Son apoyos de sección rectangular, por lo que el esfuerzo que soporta es menor en la dirección perpendicular al lado más ancho. Son los más económicos y su uso principal es en líneas de distribución en baja tensión y como apoyos de alineación en líneas de distribución secundaria (hasta 36 kV).
 - Apoyos de hormigón armado vibrado hueco (HVH). Son apoyos de sección cuadrada, por lo que todos los lados del apoyo admiten el mismo esfuerzo. Sus usos van desde apoyos de anclaje, ángulo o fin

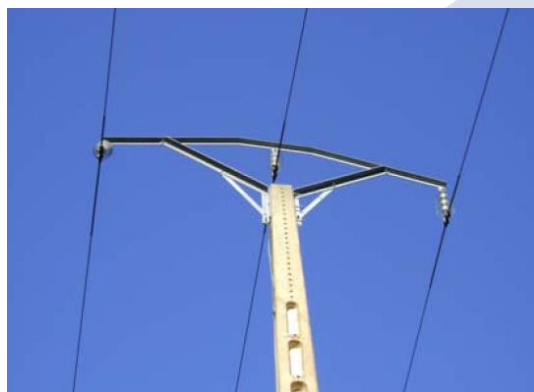
de línea en líneas de distribución secundaria a apoyos de alineación en líneas de distribución primaria (45 kV, 66 kV, 132 kV). Son apoyos muy pesados y difíciles de transportar e instalar cuando el punto donde debe ser situado tiene alguna dificultad de acceso.



Apoyo en amarre



Apoyo en Amarre con derivación



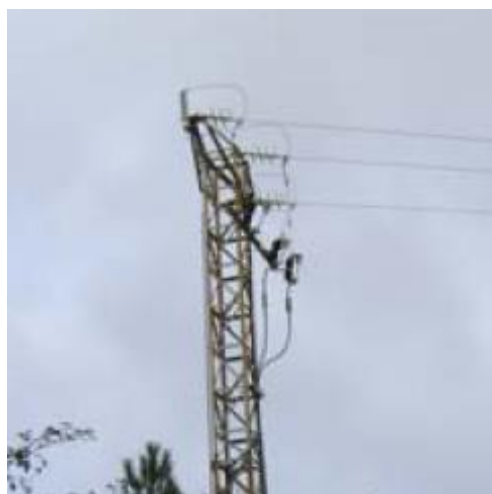
Apoyo en alineación (suspensión)



Apoyo en ángulo



Apoyo en estrellamiento



Apoyo fin de línea

Figura 35: Apoyos de línea de media tensión en diferentes disposiciones (elaboración propia)

- Apoyos metálicos.
 - Apoyos metálicos de celosía. Son los apoyos más utilizados en líneas aéreas de alta tensión, salvo en el caso de apoyos en alineación en líneas de distribución secundaria. En este tipo de líneas en la actualidad los apoyos utilizados se fabrican según la norma UNE 207017. En el caso de las líneas de distribución primaria, no existe norma para su fabricación y en su construcción se siguen las indicaciones del Reglamento de Líneas de Alta Tensión. En el caso de los apoyos contruidos según la norma UNE 207017, estos están formados por tramos que se atornillan entre sí y al tramo enterrado en la cimentación del apoyo. Cada tramo consta de cuatro montantes a los que van soldados o atornilladas celosías. Tanto los montantes como las celosías están formados por perfiles angulares de acero galvanizado. La sección del apoyo es cuadrada por lo que todos los lados pueden soportar el mismo esfuerzo. Al estar regulados por una norma UNE, los esfuerzos útiles, tanto verticales como transversales, longitudinales o de torsión, están normalizados para todos los fabricantes. No ocurre así en los apoyos utilizados en las líneas de distribución primaria o en líneas de transporte, en el que los valores de esfuerzo deben ser proporcionados por cada fabricante.
 - Apoyos metálicos de chapa. Este tipo de apoyos están formados por secciones tubulares que se atornillan entre sí y al herraje de la cimentación. Al igual que sucedía en los apoyos metálicos de celosía, hay apoyos metálicos de chapa fabricados según una norma UNE (UNE 207018) y que son utilizados en líneas de distribución secundaria y apoyos contruidos sin seguir una norma específica que son utilizados fundamentalmente en líneas de tensión nominal superior a 30 kV. La sección de estos apoyos puede ser rectangular o poligonal. En el primer caso, al igual que sucedía con los apoyos de hormigón tipo HV, el esfuerzo soportado por las caras del lado mayor del rectángulo es inferior a las otras caras. En los de sección poligonal todas las caras pueden soportar el mismo esfuerzo. Este tipo de apoyos es muy utilizado cuando es necesario situar el apoyo en zonas de difícil acceso dado que por su peso es más fácil de transportar que cualquier otro tipo de apoyo.

Los apoyos de madera están en desuso en líneas de distribución secundaria y en líneas de baja tensión y no se utilizan en instalaciones nuevas.

La separación de los cables al conjunto apoyo-cruceta se consigue mediante aisladores. En la actualidad existen dos tipos fundamentales de aisladores: aisladores de vidrio y aisladores poliméricos. Los aisladores de vidrio se forman montando cadenas de aisladores individuales en número suficiente para alcanzar la línea de fuga (contorno de la cadena de aisladores) necesaria para la tensión nominal de la línea. Los aisladores poliméricos están contruidos por un único elemento y no forma cadenas. Tal y como se ha indicado para determinar la línea de fuga del aislamiento se tiene en cuenta la tensión nominal. En algunos casos es conveniente valorar el utilizar un nivel de aislamiento inmediatamente superior al de la tensión nominal de la línea y con ello, otros requisitos relacionados con la puesta a tierra en apoyos situados en zonas frecuentadas o con elementos de maniobra son más favorables. La longitud del aislamiento es uno de los

elementos que se tienen en cuenta a la hora de determinar las dimensiones de las crucetas, ya que es necesario valorar el desplazamiento de la cadena por la acción del viento y evitar que el conductor en tensión entre en contacto con el apoyo.



Apoyo de hormigón



Apoyo metálico de celosía



Apoyo metálico de celosía



Apoyo metálico de chapa

Figura 36: Apoyos de diferentes tipos (elaboración propia)

Las cadenas se completan con los herrajes que unen los conductores al aislamiento y a este a la cruceta. Los primeros se denominan grapas y los segundos horquillas. Las grapas son de diferente tipo en función de que el apoyo sea de suspensión o de cualquiera de los otros tipos, por lo que en definitiva se disponen de cadenas de suspensión y de cadenas de amarre.

Para la operación y protección de las instalaciones se instalan diferentes dispositivos.

Sin tener en cuenta los elementos de cabecera de las líneas, que se encuentran en subestaciones y en los centros de transformación, los elementos de protección y maniobra intermedios se instalan, fundamentalmente en líneas de distribución secundaria. Las líneas de distribución primaria se suelen maniobrar y proteger exclusivamente con los elementos de cabecera.

Los principales elementos de protección y maniobra instalados en la red de distribución secundaria son:

- Seccionadores (cuchillas unipolares). Se instalan en puntos intermedios de la red con el fin de permitir el aislamiento de tramos de línea para la realización de trabajos programados o localización y/o reparación de averías.
- Cortacircuitos fusibles de expulsión (XS). Se suelen instalar en el inicio de las derivaciones para aislar a la línea principal de las averías que se producen en la derivación. También se instalan como elementos de protección de centros de transformación de intemperie. Desde un punto de vista eléctrico como aparato de maniobra es un seccionador.
- Elemento de control de red (OCR). Está formado básicamente por un interruptor automático, por lo que puede ser accionado en carga. Pueden serles asociados relés y actuar como elemento de protección. Se instalan tanto en cabecera de la línea como en puntos intermedios para facilitar la operación de la red. Disponen de reconectador con ciclos definidos de disparo-reconexión para discriminar disparos intempestivos no debidos a averías permanentes (por ejemplo, ramas de arbolado que caen inicialmente sobre la línea y la disparan, pero inmediatamente vuelven a caer ya al suelo y el reconectador vuelve a poner en servicio la red). Generalmente se programan tres ciclos disparo-reconexión. El cuarto disparo dejaría la línea abierta. Este tipo de elementos son susceptibles de estar telecontrolados.

3.3.3.2. Líneas subterráneas

En el caso de las líneas eléctricas subterráneas los conductores que las forman se encuentran soterrados en diferentes formas de instalación.

El coste de construcción de este tipo de líneas es muy superior al de las líneas aéreas y se usan en casos como en zonas urbanas, en instalaciones donde no haya sido posible la obtención de permisos de paso y no se pueda iniciar o no se pueda esperar a la resolución de un proceso expropiatorio o en zonas donde el planeamiento urbanístico u otro tipo de norma sectorial obligue a este sistema de construcción.

El incremento de coste de las líneas subterráneas respecto a las líneas aéreas aumenta mucho a medida que se sube el nivel de tensión y se debe por un lado a la necesidad de obra civil como a que los conductores utilizados son aislados y estos, para una misma sección son mucho más caros que los desnudos. Pero además para una misma potencia a transportar la sección de los conductores enterrados es mayor que los instalados al aire al

existir la necesidad de la aplicación a los primeros de coeficientes correctores que tengan en cuenta la menor disipación térmica en este tipo de instalación.

En cuanto a los diferentes sistemas de instalación de líneas subterráneas por orden de coste son:

- Líneas subterráneas con cables directamente enterrados: Los cables se instalan directamente en un lecho de arena para evitar que las piedras u otros elementos del terreno dañen a los conductores. Es el sistema de instalación menos costoso, pero tiene inconvenientes como la mayor dificultad en la localización y reparación de averías, más vulnerables a posibles daños causados por terceros al no disponer de ninguna otra protección mecánica que la del propio cable y no tienen flexibilidad para la introducción de cambios en la instalación (aumentos de sección, introducción de nuevos elementos como puntos de seccionamiento, nuevos suministros, etc...).
- Líneas subterráneas con cables entubados: Los cables se instalan en el interior de tubos, generalmente de polietileno, que a su vez se instalan directamente en el terreno. La protección frente a daños de terceros o a posibles acciones del propio terreno sobre la instalación solo es ligeramente superior ya que la única protección mecánica adicional a la del cable es la del tubo, que no supone gran cosa para maquinaria de construcción de obra civil que es la que suele causar este tipo de incidentes. Sin embargo, este tipo de instalación permite flexibilidad para introducir modificaciones en la red ya que los cables pueden ser fácilmente sustituidos en caso necesario (por averías o por necesidades de aumento de sección) y la introducción de nuevos elementos en la red también es sencilla. Durante la construcción de las líneas también se suelen dejar previstos tubos adicionales que pueden permitir en el futuro la instalación de nuevas líneas subterráneas sin necesidad de realizar nuevos trabajos de obra civil.
- Líneas subterráneas con cables entubados y hormigonados: Se trata del mismo caso que el anterior pero los tubos en lugar de ir dispuestos directamente en el terreno van embebidos en hormigón. Además de las ventajas indicadas para las líneas con cables entubados la protección mecánica de la instalación es muy elevada.

La conexión de los cables subterráneos a los diferentes elementos de la red se realiza mediante accesorios denominados terminaciones. Estos accesorios deben garantizar que se mantienen las características del conductor, como nivel de aislamiento, continuidad de la puesta a tierra de la pantalla del conductor, ...). Las terminaciones son principalmente:

- Terminaciones rectas de interior o exterior. Se usan fundamentalmente en:
 - Conversiones aéreo-subterráneas.
 - Conexiones a celdas convencionales de centros de transformación.
 - Conexiones de transformadores con bornas convencionales.
 - Conexiones y puentes en líneas aéreas (entre líneas o con elementos de maniobra) en las que no se pueden mantener las distancias reglamentarias con conductores desnudos.
 - Entradas aéreas a centros de transformación o seccionamiento.
 - Puentes para conexiones provisionales o en reparación de averías.

- Terminaciones acodadas atornillables o enchufables. Se usan fundamentalmente en:
 - Conexiones a transformadores con bornas enchufables.
 - Conexiones a celdas de centros de transformación, fundamentalmente de tipo compacto.
- Terminaciones en T. Son similares a las terminaciones acodadas, pero permiten la salida de una o más líneas derivadas desde el mismo punto de conexión.

Las uniones entre cables se realizan mediante empalmes y derivaciones. Este tipo de accesorios, al igual que las terminaciones deben garantizar las características de los cables que unen. En el caso de los empalmes, se usan para la unión de cables de diferentes bobinas durante la construcción de la línea o bien para la reparación de las líneas.

Las derivaciones se usan para la conexión directa de una derivación a una línea existente. En las líneas de distribución este tipo de accesorios se utilizan casi exclusivamente en baja tensión, ya que su uso en distribución primaria o secundaria complica la operación de la red. Generalmente los accesorios, tanto empalmes como terminaciones, se comercializan en kits que disponen de todos los elementos necesarios para su montaje.

Tabla 22: Comparación entre líneas aéreas y subterráneas (elaboración propia)

Líneas aéreas	Líneas subterráneas
Menor coste.	Coste mucho más elevado, que a su vez varía en función de la forma de instalación (cables entubados con hormigonado, cables entubados sin hormigonado, cables directamente enterrados, cables instalados en galerías, ...)
Rapidez de montaje.	El tiempo de montaje está condicionado por los trabajos de obra civil.
Menor longitud.	En general la longitud de la línea depende del trazado de los viales.
Gran exposición al medio, que provoca daños y averías.	En general tienen un número de averías muy reducido.
Gran afección a los terrenos y zonas por donde discurre la línea.	Por lo general discurren por viales de titularidad pública.
Costes de mantenimiento muy elevados.	Costes de mantenimiento muy bajos.
Operación más compleja.	Operación más sencilla.
Las modificaciones que se quieran introducir en la red suelen requerir trabajos complejos.	Muy versátil para los cambios que se necesiten introducir cuando el sistema de instalación en con cables entubados o en galerías.
Aspectos de seguridad y salud de los trabajadores más significativos: Trabajos en altura, en proximidad de tensión, en condiciones meteorológicas adversas, ...	Mejores condiciones de seguridad y salud de los trabajadores.
Impacto ambiental elevado: impacto visual, incendios forestales, efectos sobre la avifauna, ...	Impacto ambiental muy reducido y prácticamente solo durante la construcción.
Viabilidad de construcción muy difícil debido a la necesidad de obtener la autorización de los propietarios de los terrenos por los que discurre la línea en su trazado o bien someterse a dilatados procesos de expropiación.	Factible en prácticamente cualquier situación al discurrir por viales públicos y estar previstos para la construcción de este tipo de infraestructuras procedimientos de autorizaciones administrativas.
Posibles afecciones a terceros en caso de averías: caída de conductores o apoyos, transmisión de sobretensiones de origen atmosférico, etc...	Las averías quedan limitadas a la propiedad de la instalación.

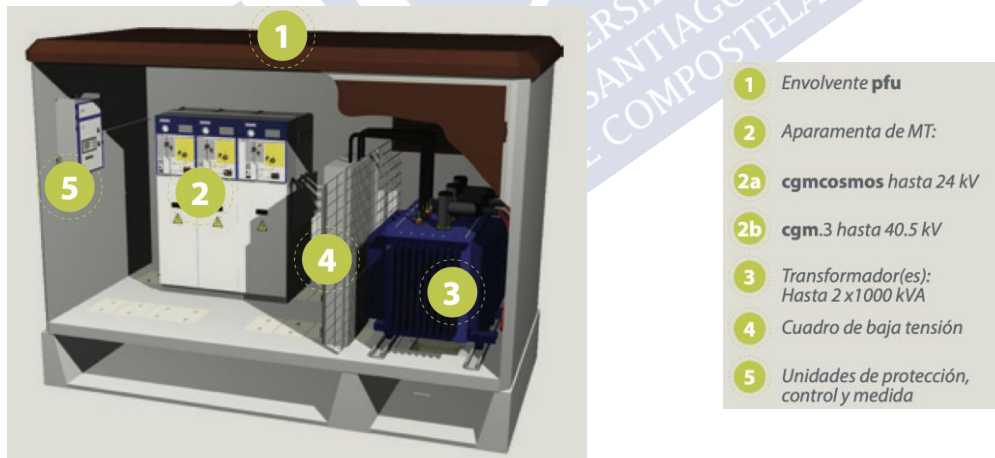
Líneas aéreas	Líneas subterráneas
Instalaciones con relativa accesibilidad a personas ajenas a su operación y mantenimiento.	Instalaciones de difícil acceso a personas ajenas a su operación y mantenimiento.
Instalaciones visibles en caso de una posible interacción con ellas.	Instalaciones de difícil detección para personas ajenas a la propiedad que pueden generar averías e incidentes causados por terceros.

3.3.3.3. Centros de transformación, distribución y seccionamiento

Según el Reglamento de Instalaciones de Alta Tensión (RD 337/2014) un centro de transformación es una “instalación que comprende uno o varios transformadores, aparata de alta y de baja tensión, conexiones y elementos auxiliares, para suministrar energía en BT a partir de una red de AT o viceversa”.

Los centros de transformación son junto con las subestaciones las instalaciones donde se ubican los transformadores y sus elementos de protección y maniobra (Figura 37).

Pueden además alojar los elementos de protección y maniobra de líneas eléctricas que entran o salen de estas instalaciones. En ese caso se denominan centros de distribución. En el caso de instalaciones que únicamente alojen los elementos de protección y maniobra de las líneas que entran o salen de ellos hablaríamos de centros de seccionamiento. Por tanto, la función fundamental de un centro de transformación es transformar la tensión de distribución secundaria (p.e. 20 kV) a la tensión de utilización (sistema 400/230 V).



Fuente: Ormazabal

Figura 37: Centro de transformación de caseta [156]

Los componentes de los centros de transformación son:

- Aparata de maniobra y protección en media tensión.
- Transformador.
- Cuadros de distribución en baja tensión.

- Equipos de recopilación de datos y comunicaciones para telemedida de los usuarios conectados a las redes de baja tensión que parten de ese centro de transformación.
- Pueden disponer de los equipos necesarios para el telecontrol de la aparamenta de maniobra.
- Instalación de puesta a tierra.

Actualmente la aparamenta de maniobra y protección en los centros de transformación son sistemas modulares de forma que se pueden realizar las combinaciones deseadas en función de la configuración de la red en la que está integrado.

La aparamenta de media tensión en este tipo de instalaciones es fundamentalmente la siguiente (Figura 38):

- Interruptores-seccionadores. Elementos con capacidad de corte en carga, pero no en falta. Tienen capacidad de aislamiento para la tensión nominal.
- Interruptores automáticos (disyuntores). Elementos con capacidad de corte tanto en carga como en falta. No tienen capacidad de aislamiento, por lo que tienen que ser instalados en serie con un seccionador o interruptor-seccionador.
- Ruptofusibles. Elementos formados por fusibles con un interruptor-seccionador. En los centros de transformación se utilizan como elemento de protección del transformador.
- Celdas para equipos de medida. En este tipo de instalaciones existen cuando es necesaria la instalación de transformadores de intensidad o tensión asociados a relés de protecciones que actúen sobre interruptores automáticos para la protección de las líneas que parten de ellos.

En particular, en caso de falta (cortocircuito) la capacidad de estos elementos es la indicada en la Tabla 23.

Tabla 23: Comportamientos de los elementos de maniobra en cortocircuitos [157]

	CAPACIDAD SOBRE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO		
	Soportarla durante un tiempo t	Cierre	Interrupción
Seccionador	SI	NO	NO
Seccionador de puesta a tierra (accionamiento con cierre rápido)	SI	SI	NO
Interruptor-Seccionador	SI	SI	NO
Interruptor automático	SI	SI	SI

Las funciones que realiza esta aparamenta en los centros de transformación, distribución o seccionamiento es la siguiente:

- Función de línea. Reciben o son el punto de inicio de líneas eléctricas. Esta función es realizada fundamentalmente por interruptores-seccionadores.
- Función de protección. Protegen elementos de la red, como líneas, transformadores de potencia y transformadores de medida. Esta función es

realizada por ruptofusibles o por interruptores-automáticos con relés de protección asociados. Esta función también se aplica a la conexión de terceros a la red de distribución secundaria, tanto consumidores como productores.

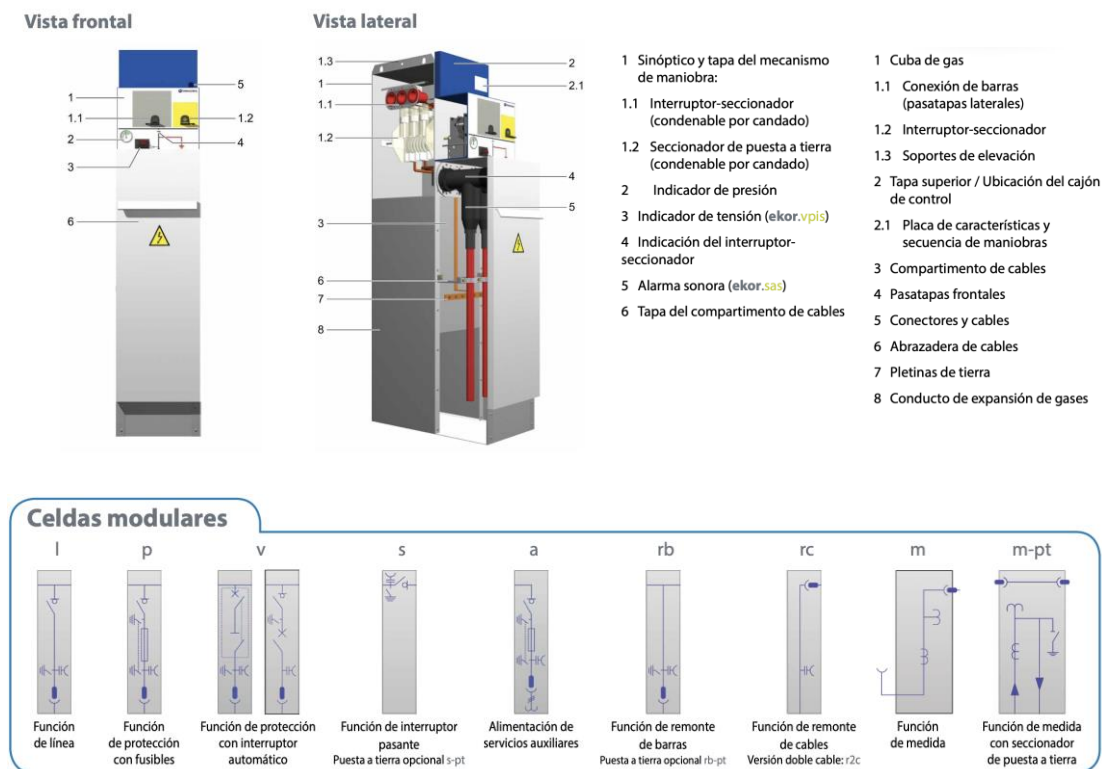
- Función de acoplamiento. Dividen el embarrado del centro de distribución o seccionamiento para distribuir el servicio según las necesidades. Esta función es realizada por interruptores-seccionadores y es propia de instalaciones de cierta complejidad.

Para evitar que se produzca el arco eléctrico entre los extremos del elemento de maniobra debido a la ionización del aire entre ellos es necesario que el corte se produzca en condiciones que permitan la extinción del arco, ya sea porque la rapidez en la acción del elemento impide esta ionización o bien porque el corte se hace en un medio que extingue el arco que pudiera producirse. Este medio puede ser el vacío, aceite mineral y desde hace años la tecnología implantada de forma generalizada es la extinción mediante hexafluoruro de azufre (SF_6).

La capacidad de extinción del arco del SF_6 es debido a la elevada electronegatividad que tiene el compuesto, que le proporciona fundamentalmente el flúor. Con ello se consigue una rápida recuperación de aislamiento entre los contactos, no solo para la tensión de trabajo de los equipos, sino para los altos valores transitorios de la tensión durante las maniobras o disparos. Durante la extinción del arco, a temperaturas de entre 15.000 y 20.000 K, el gas se descompone, pero en torno a un 99% del mismo se vuelve a recombinar para formar de nuevo SF_6 . Si existen impurezas pueden generarse pequeñas cantidades de subproductos, que permanecen confinados en las cámaras de los equipos sin que supongan ningún problema para su funcionamiento. Las características dieléctricas hacen que el hexafluoruro de azufre se utilice también como aislante en diversos equipos eléctricos.

En los centros de transformación o distribución los transformadores son los elementos que transforman la tensión de la distribución secundaria (p.e. 20 kV) a la tensión de utilización.

En las redes de distribución los transformadores más utilizados son los que tienen como dieléctrico aceite mineral. Como reglamentariamente los centros de transformación que tengan instalados estos transformadores requieren la construcción de un foso que recoja una eventual pérdida de aceite, en el caso de que en el local del centro de transformación no sea posible su construcción es posible la utilización de transformadores de resina.



Fuente: Ormazabal

Figura 38: Aparata modular con corte en SF₆ [158]

Transformadores que usan como dieléctrico aceite mineral.

Los arrollamientos están sumergidos en aceite mineral que actúa como dieléctrico. La refrigeración se facilita disponiendo los laterales de la cuba en forma de radiador para aumentar la superficie de contacto del aceite con el aire (Figura 39 y Figura 40).

En la actualidad se están introduciendo transformadores que en lugar de aceite mineral usan un éster natural biodegradable obtenido a partir de aceites vegetales. También hay transformadores que usan como dieléctrico silicona, pero no muy frecuentes en distribución.

Las dilataciones por efectos térmicos del dieléctrico son absorbidas por la deformación elástica de las aletas de refrigeración (transformadores de llenado integral) o por una cámara de aire en la parte superior de la cuba. Antiguamente estas dilataciones eran absorbidas por un depósito de expansión, que conservan los transformadores actuales de gran potencia usados en las subestaciones. Con el fin, tanto de limitar los efectos de las averías en los transformadores como de simplificar instalaciones la potencia nominal de los transformadores instalados en la red de distribución no suele superar las 1.000 kVAs.

Transformadores secos:

Tal y como ya se ha indicado, en distribución no son muy frecuentes y su uso se restringe casi exclusivamente a cuando no es posible la construcción de fosos de recogida de aceite en caso de fugas. Estos transformadores están encapsulados y moldeados al vacío en una resina epoxi, generalmente patentada por cada fabricante (Figura 41).

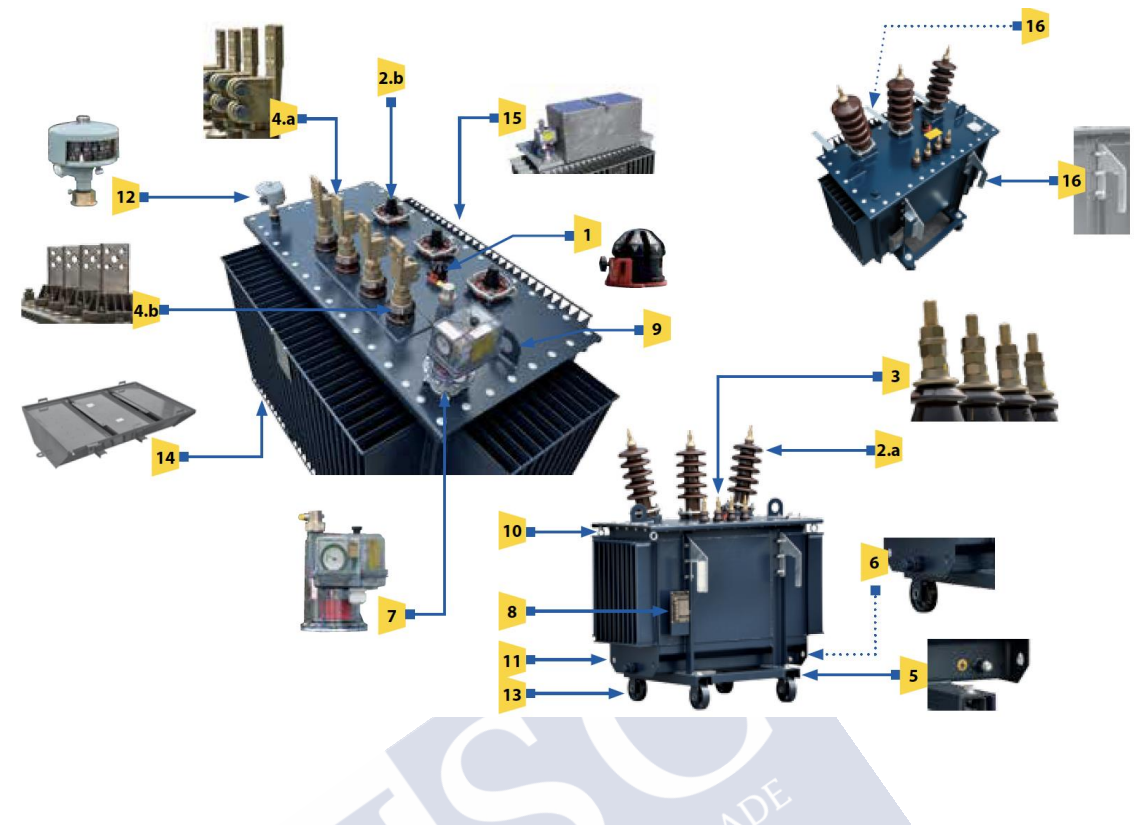


©Siemens AG

1. Núcleo de acero y devanados
2. Núcleo de acero
3. Devanados
4. Conmutador de regulación
5. Bornas de baja tensión

6. Bornas de alta tensión
7. Alojamiento para sonda de temperatura
8. Cuba
9. Soporte
10. Protección contra la corrosión

Figura 39: Transformador de distribución secundaria de aceite
Adaptado por el autor de [159]



1	Conmutador de regulación (maniobrable sin tensión)	IEC 60214
2.a	Pasatapas MT de porcelana	EN 50180
2.b	Pasatapas MT enchufables	
3	Pasatapas BT de porcelana	EN 50386
4.a	Terminales planos de conexión BT (≥ 630 kVA)	
4.b	Pasabarras unipolar BT	EN 50180
5	Terminales de tierra en la cuba	EN 50216-4
6	Dispositivo de vaciado y toma de muestras.	EN 50216-4
7	Dispositivo de llenado	EN 50464-1
	Relé de protección integral Funciones: Control de presión interna de la cuba, control de temperatura del líquido dieléctrico, control de nivel de aceite y detección de gases	EN 50216-3
8	Placa de características	EN 50464-1
9	2 Cáncamos de elevación	EN 50464-1
10	4 Cáncamos de arriostamiento	EN 50464-1
11	4 Dispositivos de arrastre	EN 50464-1
12	Dispositivo para alojamiento de termómetro Termómetro: mide la temperatura de la capa superior del líquido aislante Disponible con 2 contactos (alarma y disparo) y aguja de máxima	EN-50216-4
13	Ruedas (≥ 250 kVA)	EN-50216-4
14	Dispositivo de recogida del dieléctrico líquido	
15	Cajón cubrebornas	
16	Ganchos y soporte para autoválvulas (aplicación para poste hasta 160 kVA)	

Fuente: Ormazabal

Figura 40: Transformadores de llenado integral - Equipamiento [155]

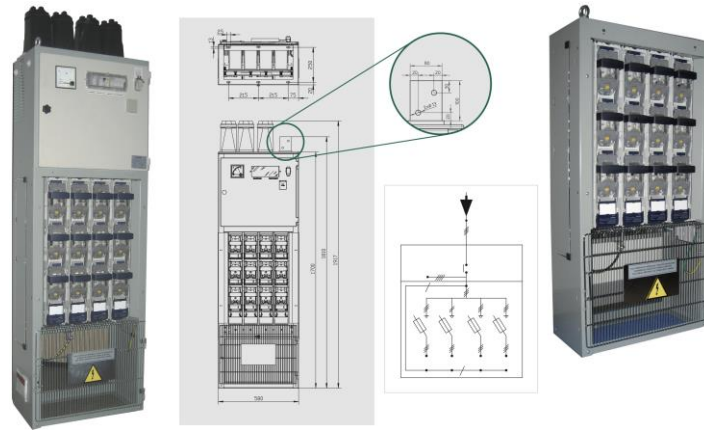


©Siemens AG

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Núcleo de tres cuerpos | 5. Conexión delta |
| 2. Devanado de baja tensión | 6. Soporte |
| 3. Devanado de alta tensión | 7. Aislamiento de resina y polvo de cuarzo |
| 4. Orificios para elevación | 8. Tomas de adaptación de tensión |

Figura 41: Transformador de distribución secundaria de aislamiento seco
Adaptado por el autor de [160]

Los cuadros de distribución son los elementos que están alimentados por el secundario del transformador y de ellos parten las líneas de baja tensión que distribuyen la energía eléctrica de ese centro de transformación a los puntos de consumo (Figura 42). El seccionamiento de las líneas se hace abriendo las bases portafusibles formadas por bases tripolares verticales cerradas, que constituyen a su vez la protección de las redes de baja tensión que parten de ellos. Las salidas de estos cuadros pueden ser también puntos de conexión de un tercero a la red (consumidor o productor). En estos cuadros también se pueden instalar relés de protección que actúen sobre el ruptofusible o interruptor automático que protege al transformador.



Fuente: Pronutec

Figura 42: Cuadro de baja tensión [161]

La descripción que se ha realizado hasta ahora de los centros de transformación se corresponde a los instalados en edificio (prefabricado o no). En zonas rurales y con potencias pequeñas (como máximo 250 kVAs), los transformadores se pueden instalar sobre apoyos, constituyendo los llamados centros de transformación de intemperie (Figura 43). En este tipo de centros, la aparamenta de maniobra y protección en alta tensión es un cortocircuito fusible de expulsión (XS) ya descrito como elemento de maniobra y protección en líneas aéreas.

Además del transformador en el apoyo se instala también el cuadro de baja tensión y los equipos de recopilación de medida de la lectura de los consumidores conectados a las redes que parten de ese centro de transformación.

Existen además otro tipo de centros de transformación en donde la aparamenta de maniobra y protección se instala en el apoyo y el transformador y el cuadro de baja tensión en una pequeña caseta. Estos centros de transformación se denominan de pie de poste y funcionalmente son equivalentes a un centro de transformación de intemperie.



Figura 43: Centro de transformación de intemperie y de pie de apoyo (autor)

3.3.4. La calidad del suministro eléctrico

El RD 1955/2000 define los aspectos sobre los que se valora la calidad del suministro eléctrico. Estos son fundamentalmente tres:

- La continuidad del suministro.
- La calidad de atención al consumidor.
- La calidad del producto.

3.3.4.1. Continuidad del suministro

En lo que se refiere a la continuidad del suministro los parámetros fundamentales relativos a la calidad de suministro son los índices TIEPI y NIEPI serán tratados en el apartado 3.4 de este capítulo relativo a la seguridad natural y energética, por lo que a continuación se tratan los otros dos aspectos.

3.3.4.2. Calidad de atención al consumidor

La calidad de atención al consumidor se refiere básicamente a plazos de respuesta a solicitudes de usuarios de la red. Los plazos que el RD 1955/2000 son los indicados en la Tabla 24, la Tabla 25 y la Tabla 26.

Elaboración de presupuestos para nuevos suministros o ampliación/reducción de potencia.

Tabla 24: Plazos para la contestación de solicitudes de suministro

Características del suministro	Límite (días)
BT hasta 15 kW sin necesidad de realizar instalaciones de extensión	5
BT cualquier potencia sin necesidad de instalación de Centro de Transformación	10
BT con centro de transformación. Suministro de obra	10
BT con centro de transformación. Suministro definitivo	20
BT con centro de transformación. Necesaria subestación	30
AT con tensión nominal de suministro igual o inferior a 66 kV	40
Otros suministros en AT	60

Ejecución de instalaciones para nuevos suministros o ampliación/reducción de potencia.

Tabla 25: Plazos para la contestación de solicitudes de suministro

Características del suministro	Límite (días)
BT sin ampliación de la red de BT	5
BT con ampliación de la red de BT	30
BT con necesidad de construcción de centro de transformación	60
BT con necesidad de construir varios centros de transformación	80
AT acometida a un solo consumidor con tensión nominal igual o inferior a 66 kV	80
AT otras situaciones	Sin definir

En el cómputo de plazos para la ejecución de instalaciones no se tiene en cuenta el tiempo necesario para la obtención de autorizaciones administrativas o los permisos que sean necesarios para la realización de los trabajos.

Otros plazos:

Tabla 26: Otros plazos relacionados con los suministros

Situación	Límite (días)
Enganche e instalación de equipo de medida (a partir de la formalización del contrato)	5
Reclamaciones debidas a medida de consumo, cortes indebidos	5 días si P<15 kW 15 días resto
Enganche después de corte por impago	24 horas desde el pago

3.3.4.3. La calidad del producto

La calidad del producto hace referencia a las características de la onda de tensión.

En este sentido la calidad puede verse afectada por:

- Variaciones en el valor eficaz de la tensión.
- Variaciones en la frecuencia.
- Interrupciones en el servicio inferiores a 3 minutos.
- Huecos de tensión. Son reducciones bruscas del valor de la tensión durante un período corto de tiempo (10 ms).
- Distorsión de la onda debido a la introducción de armónicos. Este problema surge desde la introducción masiva de receptores electrónicos conectados a la red.

La norma de referencia para la calidad del producto es la UNE-EN-50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.

Aunque el RD 1955/2000 no lo incluye en este apartado, podemos incluir como calidad del producto el valor eficaz de la tensión en el punto de conexión. En este sentido las variaciones que este reglamento permite son de un 7% respecto a la tensión nominal de la red.

3.3.5. El acceso de terceros a la red de distribución

3.3.5.1. Conexión de consumidores

En general, para la conexión de nuevos consumidores a la red de distribución es necesaria la ejecución de la infraestructura necesaria para unir el punto de consumo con el punto de conexión. Evidentemente estas instalaciones deberán cumplir tanto la reglamentación electrotécnica como cualquier regulación sectorial por la que se puedan ver afectadas en función de por dónde discurra el trazado de la red. Para ello el consumidor realizaría la solicitud de suministro que debería ser contestada según lo ya indicado en el apartado de calidad de atención al consumidor mediante un estudio técnico y económico para la potencia y nivel de tensión solicitado.

La elección de la tensión, el punto de entrega y las características del suministro deberán tener en cuenta un desarrollo racional y óptimo de la red, con el menor coste y

garantizando la calidad del suministro. En caso de discrepancia entre el solicitante y la empresa distribuidora resolverá el órgano competente de la Administración, que en este caso es la Administración Autonómica.

En función de la ubicación del suministro, el coste de esta infraestructura es asumido por el consumidor o por la empresa distribuidora de la forma indicada en la Tabla 27:

Tabla 27: Entidad que costea las infraestructuras asociadas a las solicitudes de suministro

Situación	El coste lo asume
Suministro en suelo urbanizado que previamente cuente con las dotaciones y servicios requeridos por la legislación urbanística P<100 kW y >200 kW	Empresa distribuidora de la zona
Suministro en suelo urbanizable	Solicitante
Suelo no urbano	Solicitante

En los últimos tiempos, ha habido una intensa vigilancia por la antigua Comisión Nacional de la Energía (actualmente integrada en la Comisión Nacional de los Mercados de la Competencia) en este asunto, de forma que se facilite a los solicitantes la ejecución de las instalaciones necesarias para su suministro eléctrico por sus propios medios. En este sentido de forma muy clara cualquier nueva instalación puede ser construida por el solicitante y posteriormente ser cedida a la empresa distribuidora, incluyendo la posibilidad de suscribir convenios de resarcimiento que permitan al solicitante percibir cantidades económicas si posteriormente otros consumidores se conectan a la red que este ha construido. Como mínimo estos convenios deben tener una vigencia de diez años.

El principal problema se plantea en las modificaciones que puedan ser necesarias en la red existente para atender el suministro. Por motivos de seguridad tanto para las personas como para las instalaciones y la continuidad del suministro, en general este tipo de trabajos, aunque a cargo del solicitante, se los suelen reservar las empresas distribuidoras. Existen diferentes interpretaciones en que esto deba ser estrictamente así desde un punto de vista legal, pero, en cualquier caso, los procedimientos asociados a la coordinación de actividades empresariales derivados de la legislación en materia de seguridad en el trabajo hacen bastante complicado que, en la actividad real, personal de terceros realice trabajos en las instalaciones de la empresa distribuidora.

En cuanto al nivel de tensión al que se debe conectar el nuevo suministro está, en principio, a elección del solicitante y deberá realizar sus instalaciones particulares de acuerdo con este nivel de tensión. No obstante, el RD 1955/2000 establece que las empresas distribuidoras podrán no conectar a la red de Baja Tensión a suministros a partir de 50 kW.

Los puntos de conexión proporcionados por las empresas distribuidoras para los suministros solicitados son diversos en función tanto de la reglamentación electrotécnica general como las normas particulares que las empresas distribuidoras tengan aprobadas por la Administración (Tabla 28).

Tabla 28: Puntos de conexión para suministros o productores (elaboración propia)

Alta Tensión (Distribución Primaria)	Posiciones en el lado AT de Subestaciones.
Alta Tensión (Distribución Secundaria-Media Tensión)	Posiciones en el lado MT de Subestaciones.
	Celdas de Centros de Transformación/Distribución/Seccionamiento.
	Líneas aéreas de media tensión.
Baja Tensión	Cuadros de Baja Tensión de Centros de Transformación.
	Armarios de distribución/Cajas de protección
	Líneas de Baja Tensión

Normalmente no existe conexión de consumidores en la red de transporte. Sin embargo, sí que existen casos excepcionales debido a la magnitud del suministro. Podríamos citar el ejemplo de las factorías de Alcoa en San Ciprián (Cervo-Lugo) que están alimentadas mediante dos líneas de 400 kV, que parten de la subestación de la Central Térmica de As Pontes y tienen además un pequeño suministro de emergencia desde la red de distribución a 20 kV debido a los enormes perjuicios que según el usuario les causaría la falta total en la red de 400 kV o en la subestación en la que ellos reciben a estas líneas.

3.3.5.2. Conexión de productores

Hasta la entrada en vigor de la nueva ley 24/2013 del Sector Eléctrico, los productores se clasificaban de la siguiente forma:

- Régimen ordinario: Correspondiente a las tecnologías convencionales (carbón, fuel, gas natural, ciclos combinados, nucleares, ...)
- Régimen especial: Tecnologías renovables, cogeneración y producción a partir de residuos.

En el caso del régimen especial, la conexión se regula a partir del RD 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Posteriormente entró en vigor el RD 1699/2011 por el que se regula la conexión a la red de producción de energía eléctrica de pequeña potencia, que particularizaba las condiciones de conexión para este tipo de instalaciones.

Las instalaciones del antiguo régimen especial tienen prioridad de conexión frente al resto de productores en caso de que existan limitaciones en el punto de conexión derivadas de viabilidad física o técnica de expansión de la red.

Siempre que sea posible se procurará que varias instalaciones de producción utilicen las mismas instalaciones de evacuación, aunque sean de titulares diferentes. En este caso la instalación de evacuación será propiedad de la empresa distribuidora.

Para la potencia máxima admisible en la interconexión de una instalación de producción en régimen especial o conjunto de instalaciones que compartan el punto de conexión a la red se tendrá en cuenta que:

- Conexión a líneas: La potencia total de la instalación o conjunto de instalaciones no superará el 50% de la capacidad de la línea en el punto de conexión.
- Conexión en subestaciones y centros de transformación. La potencia total de la instalación o conjunto de instalaciones no superará el 50% de la capacidad de transformación instalada para ese nivel de tensión.

En el caso de instalaciones o agrupaciones de instalaciones de más de 10 MW, tras la aceptabilidad de la empresa distribuidora, el productor debe solicitar al operador del sistema de la red de transporte (Red Eléctrica de España) su aceptabilidad en los procesos de acceso y conexión.

En el caso de Galicia, la ejecución de instalaciones derivadas del Plan Eólico supuso una importante mejora ya que sirvieron, entre otras cosas, para eliminar el impacto en la calidad de suministro en las redes de distribución secundaria en las que se vertía energía procedente de instalaciones de entidad, produciendo importantes variaciones en la tensión de la red. Por ejemplo, en el marco de este plan se construyó la subestación de Boimente,

en Viveiro-Lugo que sirve para el vertido de numerosos parques eólicos instalados en la Mariña de Lugo.

3.4. LA SEGURIDAD NATURAL Y LA SEGURIDAD ENERGÉTICA EN LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Una de las características fundamentales de las instalaciones de distribución de energía eléctrica es que son instalaciones industriales que están distribuidas por todo el territorio y además lo hacen de forma continua abarcando grandes longitudes. Esto implica que generan gran cantidad de afecciones medioambientales. Entre esas afecciones se encuentran los “servicios” que el medio ambiente aporta como ecosistema, y que según veíamos anteriormente, desde un punto de vista económico supone un capital natural, entendiendo como tales en este caso la producción de alimentos, de madera, variaciones climáticas locales, control de la erosión, efectos sobre inundaciones y sequías, control biológico de plagas agrícolas y forestales, control de escorrentías, polinización, calidad del agua, formación de suelo y nutrientes, biodiversidad y hábitats, actividades de ocio, paisaje y valores culturales [162] e interaccionan con los elementos existentes en él (ríos, elementos patrimoniales, zonas protegidas, etc.). En el caso de Galicia, en donde existen grandes masas de arbolado destinado al cultivo forestal, las relaciones entre estas masas y las líneas eléctricas cobran gran importancia, debido sobre todo a las averías causadas por el arbolado en las instalaciones y a la prevención de los incendios forestales, lo que puede causar gran impacto tanto en la seguridad natural como en la seguridad energética. En este sentido, los dos principales aspectos que afectan a los impactos sobre la seguridad natural y energética de las redes de distribución eléctrica son el diseño de las instalaciones y su mantenimiento.

3.4.1. Diseño y construcción de las instalaciones

Para el diseño y construcción de estas instalaciones, la legislación de aplicación es, fundamentalmente la indicada en la Tabla 29.

Tabla 29: Normativa de diseño y construcción de instalaciones eléctricas de distribución (elaboración propia)

Texto Legal	Título	Instalaciones de Distribución afectadas.
RD 1955/2000	Por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.	Todas las instalaciones de transporte y distribución. Afecta fundamentalmente al diseño, limitando la caída de tensión máxima y estableciendo criterios sobre trazado de líneas y locales de centro de transformación.
RD 842/2002	Reglamento electrotécnico para baja tensión	Líneas aéreas y subterráneas de Baja Tensión.
RD 223/2008	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09	Líneas Aéreas y Subterráneas de tensión superior a 1 kV.
RD 1432/2008	Por el que se establecen medidas para la protección de la avifauna contra la colisión y la electrocución en líneas eléctricas de alta tensión.	Líneas aéreas de Alta Tensión.
Instrucción 5/2011	De 13 de abril de la Consellería de Economía e Industria de la Xunta de	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.

Texto Legal	Título	Instalaciones de Distribución afectadas.
	Galicia para el establecimiento de criterios en materia de determinación de los derechos de acometida en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.	Actualmente solo es aplicable las determinaciones contenidas en el punto 7 (previsión de cargas eléctricas) a excepción de sus dos últimos párrafos y las contenidas en el punto 8 (dimensionamiento de las acometidas y extensiones de redes de distribución) con excepción del punto 8.3 (para viviendas unifamiliares en núcleo rural), debido a las modificaciones introducidas por la Instrucción 1/2016 descrita más abajo.
Instrucción 2/2012	De 2 de mayo de la Dirección Xeral de Enerxía e Minas de la Consellería de Economía e Industria de la Xunta de Galicia por la que se dictan las normas para la autorización de la puesta en servicio de instalaciones eléctricas y para los procedimientos de tramitación administrativa de las instalaciones de distribución de Baja Tensión.	Líneas aéreas y subterráneas de Baja Tensión en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
Ley 8/2013	De 28 de junio de Carreteras de Galicia	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
RD 337/2014	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23	Subestaciones, Centros de Transformación y Centros de Seccionamiento.
Ley 2/2016	De 10 de febrero del Suelo de Galicia.	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
Decreto 66/2016	De 26 de mayo de la Consellería de Infraestructuras y Vivienda por el que se aprueba el reglamento general de carreteras de Galicia.	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
Decreto 143/2016	De 22 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de la ley 2/2016 de 10 de febrero del Suelo de Galicia.	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
Instrucción 1/2016	De 20 de junio de la Dirección Xeral de Enerxía e Minas de la Consellería de Economía e Industria de la Xunta de Galicia sobre autorizaciones en materia de acometidas, modificaciones de líneas eléctricas de alta tensión y licencias urbanísticas de instalaciones eléctricas.	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
Decreto 9/2017	De 12 de enero, por el que se establecen los órganos competentes para la resolución de los procedimientos de autorización de instalaciones eléctricas que sean competencia de la Comunidad Autónoma de Galicia.	Todas las instalaciones de distribución en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.
	Ordenanzas municipales y planeamiento urbanístico de los Ayuntamientos afectados.	Todas las instalaciones de distribución.

Además de la normativa oficial, las empresas distribuidoras de energía eléctrica elaboran, amparándose en la reglamentación técnica oficial, normativa propia que, una vez aprobada por la Administración competente, es de obligado cumplimiento para las instalaciones construidas dentro de su ámbito de actuación.

Este tipo de normas son fundamentalmente de los siguientes tipos:

- Normas particulares para instalaciones de enlace: Regulan los aspectos técnicos y constructivos de la conexión de suministros en Baja y Media Tensión a la red de distribución y equipos de medida.
- Proyectos tipo de instalaciones: Al existir elementos comunes y repetitivos en las instalaciones de distribución, las empresas distribuidoras pueden elaborar proyectos tipo que regulen estos elementos comunes y repetitivos y posteriormente el proyecto individual de la instalación hace referencia al proyecto tipo y después aborda los aspectos particulares de la instalación, en concreto, proyectada. Las instalaciones de distribución, ya sean construidas por la empresa distribuidora o por un tercero que vaya a cederlas a esta, deben ser proyectadas y ejecutadas conforme a los proyectos tipo aprobados.
- Especificaciones técnicas de materiales: Definen los tipos y características de los materiales a emplear en las instalaciones de distribución del ámbito de la empresa que emite la norma. Aunque este tipo de normas no se suele someter a la aprobación de la Administración, al ser citadas en las Normas Particulares o en los Proyectos Tipo que sí son aprobados, son de obligado cumplimiento también.

El objetivo final de este tipo de normativa interna de las empresas distribuidoras tiene como objeto estandarizar y limitar el tipo de instalaciones y materiales existentes en su actividad, con el fin de racionalizar la operación y el mantenimiento de las redes de distribución (Tabla 30).

Tabla 30: Enlaces a normativas particulares de las principales distribuidoras eléctricas (elaboración propia)

	https://www.edistribucion.com/es/conocenos/instalaciones-distribucion-red/materiales-electricos-normas.html
 Grupo IBERDROLA	Solo disponible conexión de productores: https://www.i-de.es/gestiones-online-soporte/conexion-productores/documentacion-tecnica
 Grupo Naturgy	http://www.ufd.es/informacion-tecnica/normativa/
 DISTRIBUCIÓN	https://www.viesgodistribucion.com/normativa
 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	https://www.eredesdistribucion.es/es/especificaciones-tecnicas/?r=1
Recopilación 	http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/EspecificacionesEmpresasSuministradoras.aspx?regl=RCESCT http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/EspecificacionesEmpresasSuministradoras.aspx?regl=RAT http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/EspecificacionesEmpresasSuministradoras.aspx?regl=RAT

3.4.2. El mantenimiento de la red de distribución

3.4.2.1. Consideraciones generales sobre el mantenimiento de las redes de distribución

Dentro de las actividades operativas de la distribución de energía eléctrica cobran una importancia fundamental el mantenimiento de las instalaciones, sobre todo en lo que respecta al cumplimiento reglamentario de las instalaciones. En los diferentes reglamentos técnicos citados en la descripción del diseño de las instalaciones se establece la necesidad de asegurar a lo largo del tiempo el cumplimiento de la diferente reglamentación aplicable a cada instalación en función de su tipo y momento de su construcción.

Este cumplimiento se garantiza mediante la realización periódica de verificaciones (si son realizadas por el titular de la instalación, solo en el caso de instalaciones eléctricas propiedad de entidades de producción, transporte y distribución de energía eléctrica) o bien de inspecciones realizadas por un organismo de control, en el caso de instalaciones que no sean propiedad de las entidades citadas.

Los reglamentos (Tabla 31) fijan los puntos mínimos de verificación o inspección y del su resultado salen los posibles defectos que se clasifican por su criticidad:

- Muy grave: los que constituyen un riesgo grave e inminente para la seguridad de las personas o de los bienes.
- Grave: los que no suponen un riesgo grave e inminente para la seguridad de las personas o de los bienes, pero puede serlo al originarse un fallo en la instalación.
- Leve: no supone un peligro para las personas o los bienes, no perturba el funcionamiento de la instalación y la desviación reglamentaria no tienen un valor significativo para el uso o funcionamiento de la instalación.

La periodicidad en la verificación o inspección periódica de las instalaciones es para líneas de Alta Tensión, Centros de Transformación y Subestaciones cada tres años, mientras que para líneas de distribución de Baja Tensión no se establece la necesidad de verificación o inspección periódica.

En el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia, los defectos detectados deben corregirse en el siguiente plazo en función de su gravedad:

- Muy grave: en el plazo más breve posible y en caso de apreciarse grave peligro de accidente la corrección debe ser inmediata o proceder al corte de suministro.
- Grave: plazo máximo de 6 meses.
- Leve: su corrección debe incluirse en el plan de mantenimiento correctivo del año siguiente al de su inspección.

Tabla 31: Normativa aplicable a la inspección/verificación y corrección reglamentaria (elaboración propia)

Texto Legal	Título	Instalaciones de Distribución afectadas.
RD 842/2002	Reglamento electrotécnico para baja tensión	Líneas aéreas y subterráneas de Baja Tensión.
RD 223/2008	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09	Líneas Aéreas y Subterráneas de tensión superior a 1 kV.

Texto Legal	Título	Instalaciones de Distribución afectadas.
RD 337/2014	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23	Subestaciones y Centros de Transformación y de Seccionamiento.
Orden 28/10/2002	De la Consellería de Industria e Comercio de la Xunta de Galicia por el que se establece el programa aplicable para la realización de las operaciones de mantenimiento y se establecen los plazos de corrección de los defectos tipo que se detectan en las operaciones de inspección y mantenimiento de las instalaciones eléctricas de distribución.	Todas las instalaciones de distribución. Solo en vigor los artículos 7, 8 y 9. El resto quedó derogado por el Decreto 9/2017 de la Consellería de Economía, Empleo e Industria. Los artículos en vigor se refieren a la necesidad de presentar programas anuales de mantenimiento, la entrega del informe de cumplimiento de los programas de mantenimiento presentados y los plazos establecidos para la corrección de los defectos detectados.

3.4.2.2. La gestión de la biomasa en las redes de distribución de electricidad

Dentro de la dimensión ambiental de la sostenibilidad en la actividad distribución de energía eléctrica uno de los aspectos destacados debido a su impacto en el territorio es la gestión de la vegetación en el entorno de las líneas eléctricas. Dado que estas abarcan todo el territorio es necesario considerar los diferentes estados de las formaciones vegetales existentes en él, desde áreas destinadas a la producción forestal con una tipología muy específica de vegetación a otras donde se conserva vegetación autóctona. El mantenimiento de la continuidad del suministro y el desarrollo legislativo en la materia han convertido estos trabajos en unos grandes consumidores de recursos dentro de las organizaciones que gestionan las redes, por lo que es fundamental encontrar procedimientos y metodología óptimos que hagan compatibles las necesidades técnicas, de gestión y regulatorias de los titulares de estas instalaciones con los requisitos legales y sociales en materia ambiental.

A nivel menos importante, pero tampoco despreciable, también se generan otras situaciones como pérdida de producción forestal y gravámenes sobre los terrenos por los que transcurre el trazado de las líneas eléctricas que suponen importantes puntos de conflicto entre los propietarios de los terrenos y las empresas propietarias de las instalaciones de distribución de energía eléctrica.

Los trabajos de gestión de la biomasa en estas instalaciones obtuvieron un importante impulso a raíz de la gran cantidad de incendios forestales que sucedieron en Galicia en 2006, independientemente de que fueran o no provocados por las líneas eléctricas, lo que generó tanto un desarrollo legislativo como una concienciación en las propias empresas distribuidoras que hizo que estas desarrollasen planes específicos y complejos (y por lo tanto costosos) para este tipo de tareas. También resultan evidentes las consideraciones ambientales que supone la acción, no solo sobre masas de arbolado para aprovechamiento forestal, sino también en muchos casos sobre arbolado y vegetación existente de forma natural. Vemos en lo descrito hasta ahora aspectos medioambientales, económicos y sociales, así como también normativos y legislativos, por lo que la gestión de la biomasa supone un importante aspecto a tener en cuenta en la sostenibilidad de la red de distribución.

Los efectos de la gestión de vegetación en el entorno de las instalaciones de distribución de energía eléctrica pueden verse desde varios puntos de vista. Viendo el territorio por el que discurren las líneas eléctricas como un proveedor de servicios del

ecosistema, definidos estos como los productos y servicios proporcionados por los ecosistemas de los que los humanos obtienen beneficio [163] podemos ver efectos como la posibilidad de consecuencias negativas para la conservación de la biodiversidad debido a que los árboles y otra vegetación constituyen el hábitat para muchas especies de animales y plantas, la afectación a sistemas radiculares del arbolado que protegen a los suelos de la erosión y afectación estética que finalmente puede afectar al valor del suelo. En lo que respecta a los efectos sobre el hábitat de los animales que habitan el entorno, existen estudios que indican que hasta pasados 2,5 años la zona afectada no es adecuada para alimentar los pequeños mamíferos [164]. Teniendo en cuenta que los ciclos de gestión están entre 3 y 4 años hacen difícil el establecimiento de este tipo de seres vivos en estas áreas. Si bien es cierto que hay estudios que sugieren que la variación estructural que estos corredores establecen en el territorio pueden crear más hábitat para la vida salvaje que la que destruyen [165] esto requiere implementar sistemas de gestión de la vegetación sensibles desde el punto de vista medioambiental. Esto cobraría especial importancia en masas vegetales de carácter autóctono donde sería indicado realizar estudios específicos sobre los procedimientos de gestión a emplear.

Desde el punto de vista del impacto visual, uno de los efectos negativos es la pérdida de continuidad en el paisaje. Sin embargo, esta misma situación puede ser beneficiosa en caso de incendio forestal, al comportarse esta discontinuidad como un cortafuegos que impida o dificulte la propagación del fuego.

También se ha descrito la posibilidad de la introducción de especies vegetales y animales indeseables [166] así como el uso como caminos de paso por parte de animales depredadores que generen daños en explotaciones agrícolas o ganaderas y también su uso por parte de otro tipo de animales como caballos y especies de vacuno de forma que les proporcionen acceso a carreteras y provoquen accidentes de tráfico.

Otro de los efectos negativos que podríamos encuadrar en el ámbito social es la relación entre las líneas eléctricas y los incendios forestales. En este sentido el incendio podría ser provocado por:

- Un problema de funcionamiento de la instalación: Desprendimiento de elementos metálicos incandescentes correspondientes a cables u otros elementos de la instalación o arcos eléctricos en presencia de material combustible próximo como biomasa.
- La acción de un elemento externo a la instalación que pone en contacto material combustible con la instalación. Por ejemplo, la caída de arbolado sobre la línea o el contacto de animales (sobre todo aves) con conductores.

Independientemente de que en cualquier punto de la red la biomasa debe estar adecuadamente gestionada, debe considerarse una especial precaución zonas especialmente sensibles en materia de incendios forestales. En este sentido, la Administración Autonómica, a través del Plan de Defensa contra los Incendios Forestales (PLADIGA) [167] ha definido dos tipos de áreas: Ayuntamientos declarados como Zonas de Alto Riesgo de incendio (ZAR) (Figura 44) y Parroquias de Alta Actividad Incendiaria (PAII). En ellas, la planificación de la gestión de la vegetación debería contar con medidas específicas relacionadas con la prioridad en la ejecución de los trabajos.

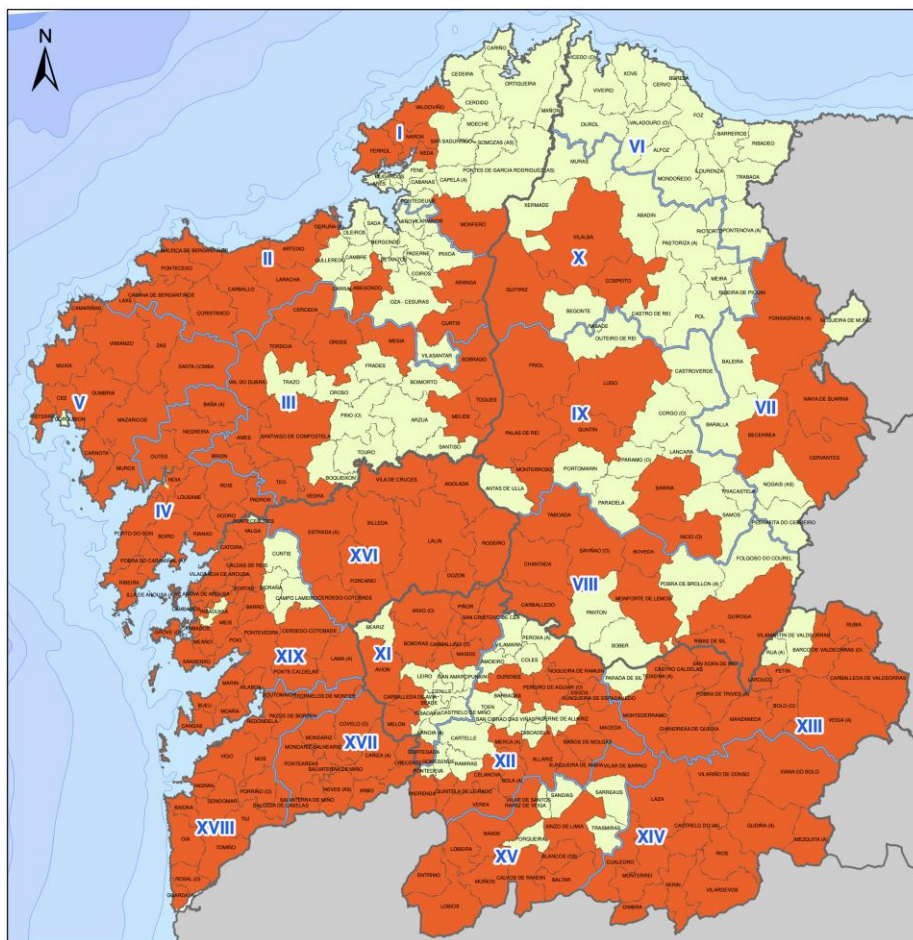


Figura 44: Zonas de Alto Riesgo de Incendio [168]

Desde el punto de vista social, el efecto negativo más importante de los trabajos de gestión de la vegetación, son los riesgos laborales a los que están sometidos los operarios que llevan a cabo los trabajos. Este tipo de trabajos llevan asociados riesgos muy importantes debido a factores como la proximidad de instalaciones eléctricas en tensión, el manejo de maquinaria de corte, trabajos en zonas de orografía complicada y de difícil acceso en caso de algún accidente, el manejo de elementos vegetales pesados o de gran tamaño como árboles o ramas y la exposición a animales que pueden atacar a los trabajadores.

Otro efecto en las zonas de cultivo forestal es la pérdida económica debido a la imposibilidad de plantación en la franja de servidumbre de la línea eléctrica que, aunque haya habido una compensación económica en forma de acuerdo voluntario o de la cantidad establecida en el procedimiento expropiatorio, esta nunca llega al valor de la explotación forestal del terreno ocupado. Esta pérdida económica se multiplica en el caso de que la parcela afectada pierda posibilidad de edificabilidad o urbanización. Dado que, como ya se ha explicado, el establecimiento de la servidumbre de paso no implica el traspaso de la propiedad del terreno al titular de dicha servidumbre sino que permanece en el propietario del terreno, frecuentemente se producen conflictos con los propietarios debido a cuestiones como el alcance de la servidumbre de paso o incluso poner en cuestión su existencia, procedimientos de acceso a las parcelas, daños en estas, etc. En no pocas ocasiones estos conflictos derivan en la oposición, por parte del propietario del terreno, a los trabajos de gestión de la vegetación.

El trazado de la línea eléctrica aérea sobre el territorio genera una servidumbre de paso que el Reglamento de Líneas de Alta Tensión define como la proyección sobre el suelo de los conductores extremos, considerados estos y sus cadenas de aisladores en sus condiciones más desfavorables, sin contemplar ninguna otra distancia adicional. Estas condiciones más desfavorables suponen considerar a los conductores a las cadenas de aisladores en su máxima desviación. Estas condiciones, de acuerdo con el citado reglamento, se calculan para que estén sometidos a las acciones de su propio peso y de una sobrecarga de viento a 120 km/h a una temperatura de 15 °C [169]. El Reglamento de Líneas de Alta Tensión, define una zona de protección de la línea eléctrica respecto a bosques, árboles y masas de arbolado a un área definida por la zona de servidumbre de vuelo, incrementada por la siguiente distancia de seguridad a ambos lados:

$$D_{add} + D_{el} = 1,5 + D_{el} \text{ en metros con un mínimo de 2 metros (Ec. 14)}$$

Donde: D_{el} = Distancia de aislamiento, D_{add} = Distancia adicional que asegura que la masa de arbolado no se acerque a una distancia inferior que el valor de la distancia de aislamiento.

Aplicando la fórmula a los valores de tensión normalizados en las líneas de transporte y distribución obtendríamos los valores indicados en la Tabla 32.

Además, este Reglamento prescribe la necesidad de cortar los árboles que constituyen un peligro para la conservación de la línea. Por otro lado, el Reglamento por el que se regula la actividad de distribución de energía eléctrica [170] define la servidumbre de paso como la franja que comprende: la servidumbre de vuelo definida anteriormente, el establecimiento de apoyos para los conductores, el derecho de paso o acceso para la construcción, vigilancia, conservación y reparación de la línea eléctrica y el corte de arbolado. La servidumbre de paso no traspasa a su titular la propiedad del terreno. Este reglamento prohíbe la plantación de árboles en la franja definida por la proyección sobre el terreno de los conductores extremos en las condiciones más desfavorables, incrementada con las distancias reglamentarias a ambos lados de la proyección.

Tabla 32: Distancia a masas de arbolado según el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [169]

Tensión Nominal (kV)	Tensión más elevada (kV)	Del (m)	Dadd + Del (m)	Distancia mínima (m)
	3,6	0,08	1,58	2,00
	7,2	0,09	1,59	2,00
	12	0,12	1,62	2,00
15	17,5	0,16	1,66	2,00
20	24	0,22	1,72	2,00
	30	0,27	1,77	2,00
30	36	0,35	1,85	2,00
45	52	0,60	2,10	2,10
66	72,5	0,70	2,20	2,20
	123	1,00	2,50	2,50
132	145	1,20	2,70	2,70
	170	1,30	2,80	2,80
220	245	1,70	3,20	3,20
400	420	2,80	4,30	4,30

La adquisición de la servidumbre de paso por parte del titular de línea eléctrica puede ser por mutuo acuerdo con el propietario del terreno o mediante la solicitud de declaración de utilidad pública por parte del titular de la línea lo que inicia el procedimiento para la expropiación de la servidumbre. Existen instalaciones para las que, debido a su antigüedad, es difícil encontrar la documentación que registra la constitución de la servidumbre de paso. En estos casos se aplica el concepto de prescripción adquisitiva del Código Civil, por el que se adquiere el derecho por la posesión continuada por el tiempo señalado en la ley, que en este caso sería de veinte años.

En lo que respecta a las líneas de Baja Tensión (Tensión igual o inferior a 1 kV), el Reglamento de Baja Tensión que las regula [171] únicamente indica que se utilizarán preferentemente, en zonas de arbolado, cables aislados. En el caso de conductores desnudos indica la necesidad de tomar las medidas necesarias para que el árbol y sus ramas no lleguen a hacer contacto con la línea.

En Galicia está vigente la Ley de prevención de incendios forestales de Galicia [172] que establece que deberá gestionarse la biomasa hasta una distancia de 5 metros desde la proyección de los conductores eléctricos más externos, considerando su desviación máxima producida por el viento, calculada de acuerdo con el Reglamento de Líneas de Alta Tensión anteriormente citado. Esta Ley únicamente hace referencia a las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica sin hacer distinción de su tensión. Estos valores exceden los indicados en la reglamentación sectorial, pero también exceden claramente lo que se hace de forma excepcional en otros lugares. En el verano de 2018 se produjo en California (Estados Unidos) el incendio forestal Camp Fire de grandes dimensiones y con graves consecuencias en vidas humanas y daños económicos. Este incendio estuvo activo durante 17 días y afectó a 620 km² y causó 85 muertos, 2 heridos y 18.804 estructuras destruidas [173]. La causa del incendio sigue bajo investigación [173], pero la compañía eléctrica Pacific Gas and Electric Company (PG&E) ha tenido que tomar medidas económicas derivadas de posibles reclamaciones por el incendio [174] [175]. Hasta la fecha este fue el mayor y más destructivo incendio después de una larga serie de incendios causados, según investigaciones periodísticas por equipamiento de esta empresa (Figura 45) [175].

En febrero de 2019 PG&E emite el documento de modificación del plan de seguridad contra incendios en el que las distancias que contempla son sensiblemente inferiores a los indicados en la ley gallega en un escenario que el plan define como gestión mejorada de la vegetación (EVM, *Enhanced Vegetation Management*) donde la distancia a la vegetación es de 12 pies (3,6576 m) frente a los 4 pies (1,2192 m) de gestión convencional [176].

THE WALL STREET JOURNAL.

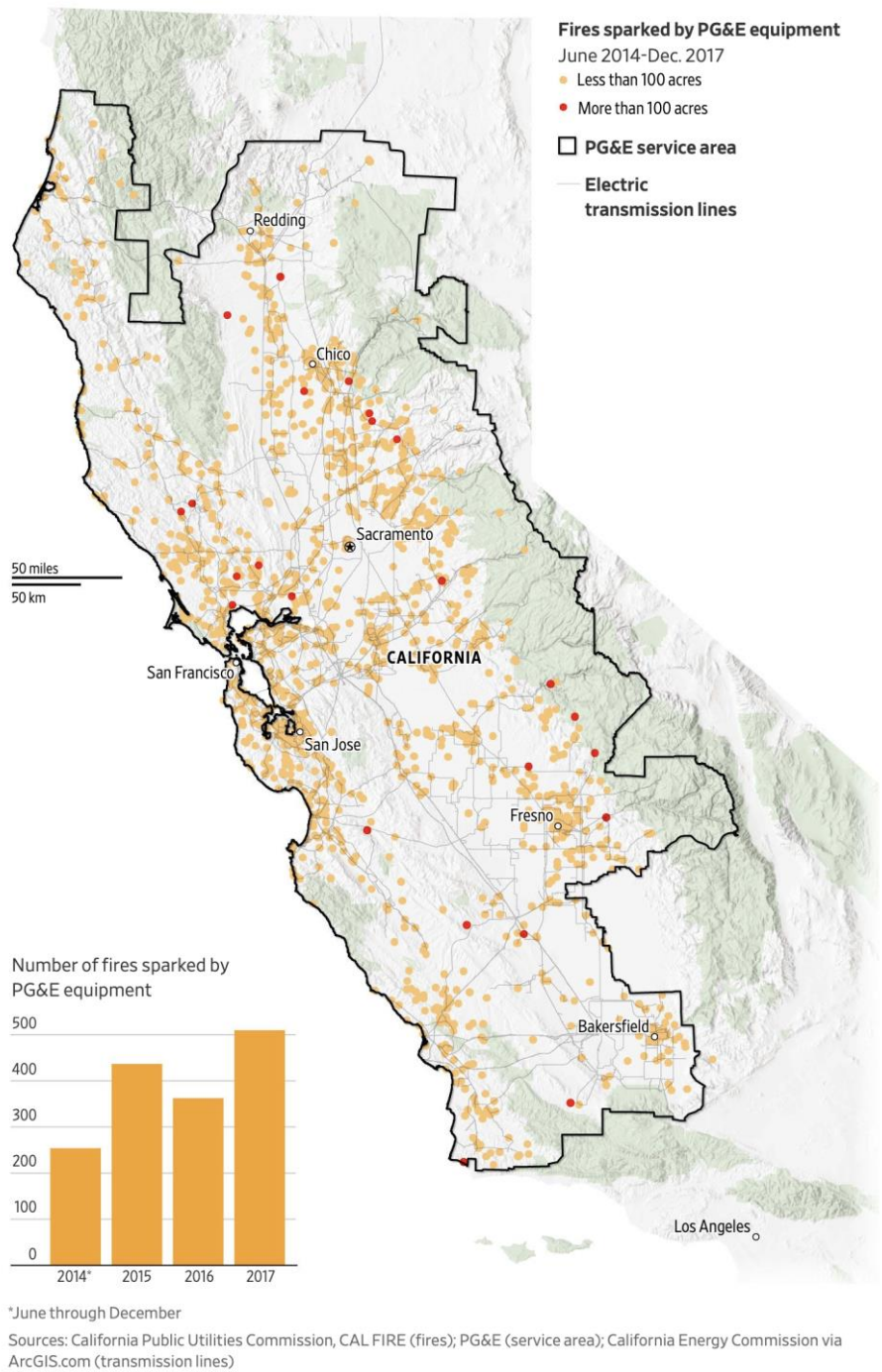


Figura 45: Localizaciones de incendios causados por líneas eléctricas en la zona de PG&E [175]

Reproducido con permiso de Dow Jones & Company, Inc., de The Wall Street journal; PG&E Sparked at Least 1,500 California Fires. Now the Utility Faces Collapse;
Gold, Russell, Blunt, Katherine, Smith, Rebecca; 13/01/2019; News Corporation.; Dow Jones & Co., 2015; permiso transmitido a través de Copyright Clearance Center, Inc.

En lo que respecta a España, en el decenio 2006-2015, que es el último con datos de causalidad (Tabla 33 y Figura 46), se produjeron 1.761 incendios con líneas eléctricas identificadas como causa cierta del siniestro y otros 493 con causa supuesta de incidentes en líneas eléctricas, lo que significa que el 8,40% de los siniestros con causa cierta conocida corresponden a líneas eléctricas. Si se tiene en cuenta los incidentes con causas supuestas, en el cómputo total, las líneas eléctricas aparecen como responsables del 6,12% del total de incidentes, correspondiendo a un 8,68% de la superficie total forestal afectada. No parece que exista una predisposición a pensar en las líneas eléctricas como causantes de los incendios forestales, ya que únicamente el 3,11% de los casos supuestos se asocian a las líneas.

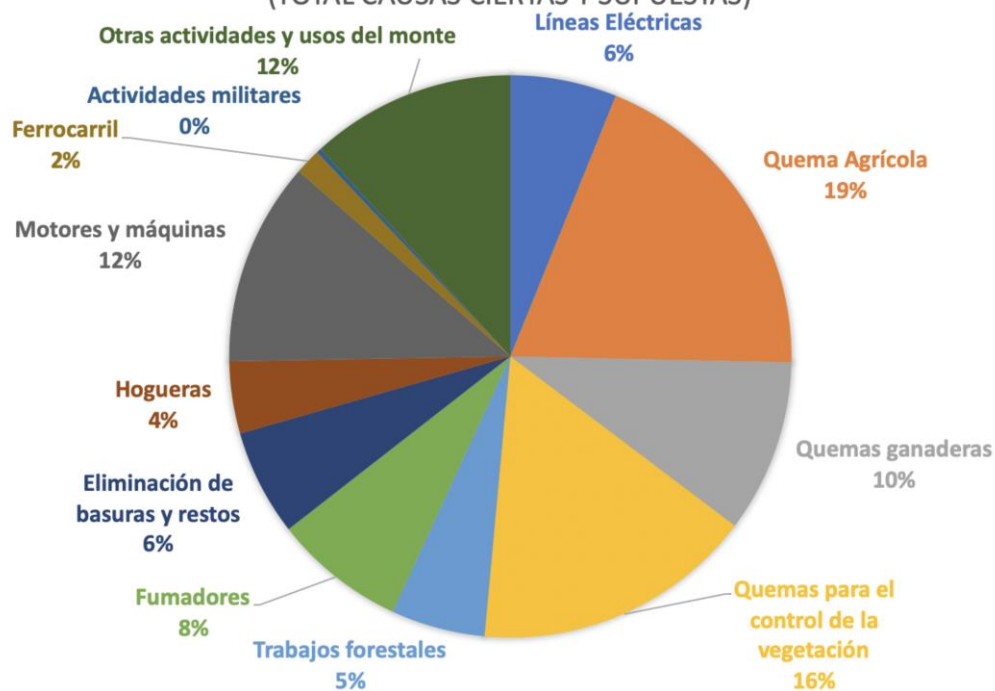
Tabla 33: Causalidad incendios forestales España (decenio 2006-2015) [177]

	Número de siniestros					Superficies			
	Tipo de Causa				Total	Veget. Leñosa		Veg. Herb.	Total Forestal
	Cierta		Supuesta			Arbolado	No arbol.		
	Número	%	Número	%					
Líneas Eléctricas	1761	78,13	493	21,87	2254	7084,76	11765,47	5461,22	24311,45
Quema Agrícola	4165	58,89	2907	41,11	7072	5821,5	14503,34	5660,33	25985,17
Quemas ganaderas	1821	49,70	1843	50,30	3664	1500,84	12949,17	3333,23	17783,24
Quemas para el control de la vegetación	3119	52,38	2836	47,62	5955	1933,53	8859,18	1513,65	12306,36
Trabajos forestales	1492	74,90	500	25,10	1992	2663,7	3211,66	473,45	6348,81
Fumadores	811	29,05	1981	70,95	2792	16816,56	9498,37	4312,71	30627,64
Eliminación de basuras y restos	1204	53,51	1046	46,49	2250	1624,04	4325,69	2324,46	8274,19
Hogueras	874	57,27	652	42,73	1526	2523,46	1680,19	958,33	5161,98
Motores y máquinas	3160	73,27	1153	26,73	4313	28309,27	47876,2	12182,72	88368,19
Ferrocarril	349	63,45	201	36,55	550	551,83	1180,44	641,87	2374,14
Actividades militares	80	78,43	22	21,57	102	3299,75	3090,39	2926,25	9316,39
Otras actividades y usos del monte	2117	48,78	2222	51,21	4339	29045,81	16436,61	7030,15	51512,57
Total	20953	56,92	15856	43,08	36809	101175,05	135376,71	46818,37	283370,13

Independientemente de los requisitos legales asociados a la biomasa existente en el entorno de las redes eléctricas, existe una evidente necesidad técnica derivada de las siguientes cuestiones:

- Mantenimiento de la continuidad del suministro. El arbolado es una fuente muy importante de averías en la red de distribución debido a la caída de árboles y ramas sobre las líneas eléctricas.
- Establecer caminos que permitan el recorrido de las líneas en caso de averías y el acceso a las líneas para su mantenimiento y en su caso su reparación.

INCENDIOS FORESTALES ASOCIADOS A LÍNEAS ELÉCTRICAS (TOTAL CAUSAS CIERTAS Y SUPUESTAS)



SUPERFICIE FORESTAL AFECTADA POR CAUSA

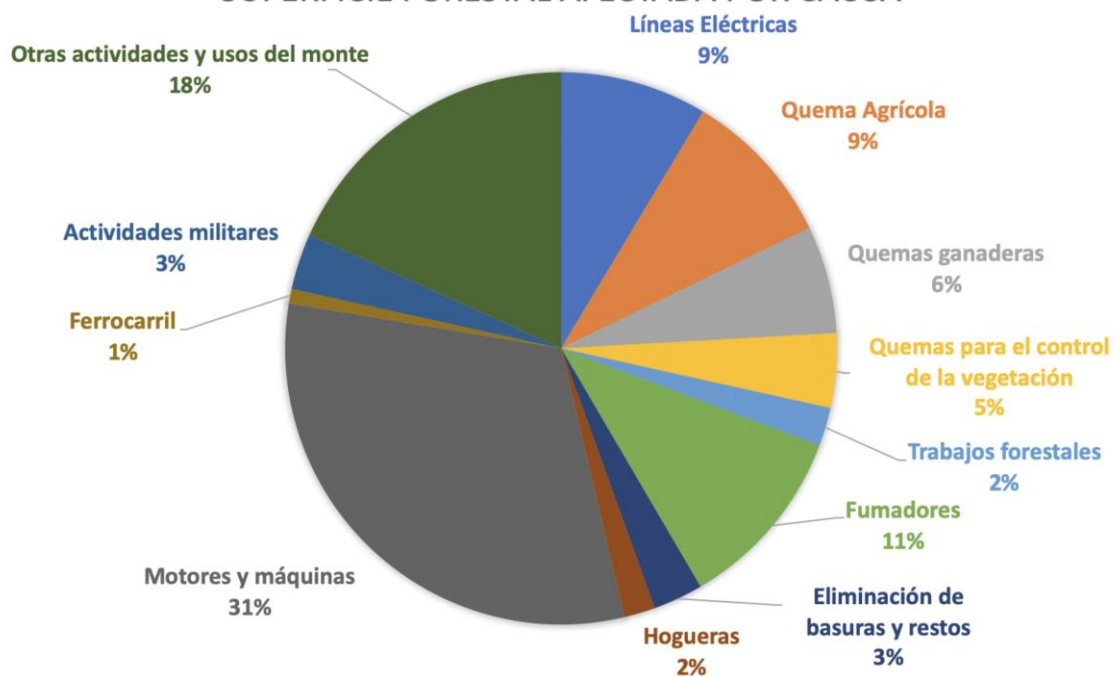


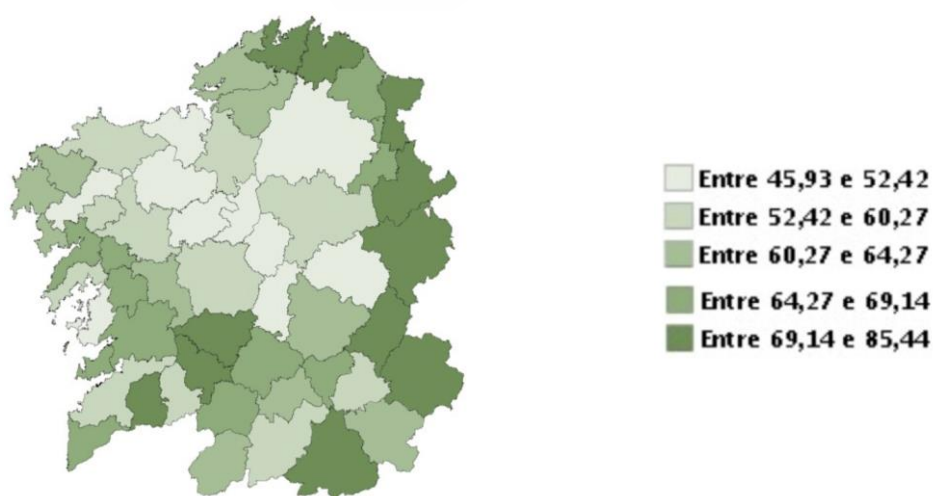
Figura 46: Causalidad incendios forestales España 2006-2015
Elaboración propia a partir de [177]



Figura 47: Daños causados por caída de arbolado sobre líneas eléctricas (autor)

En el año 2015 la superficie forestal en Galicia suponía el 60,94% del territorio de la Comunidad Autónoma (Figura 48 y Figura 49) [178].

A la hora de analizar las interacciones entre la red de distribución de energía eléctrica y la biomasa forestal también es importante tener en cuenta las especies que la componen (Figura 50). En el caso de Galicia presenta diferencias entre la zona costera, donde predominan las masas de eucaliptos, mientras que en el interior de la provincia predominan los bosques de otras frondosas, aunque cada vez se aprecia más su presencia en algunas zonas del interior, sobre todo en el caso de la provincia de A Coruña. La plantación masiva de esta especie en este territorio, sobre todo en las zonas costeras, se debe a que es una especie altamente productiva debido a su elevada velocidad de crecimiento.



Fuente: IGE: <http://www.ige.eu>

Figura 48: Superficie forestal en Galicia - % sobre el total de la comarca 2018 [178]

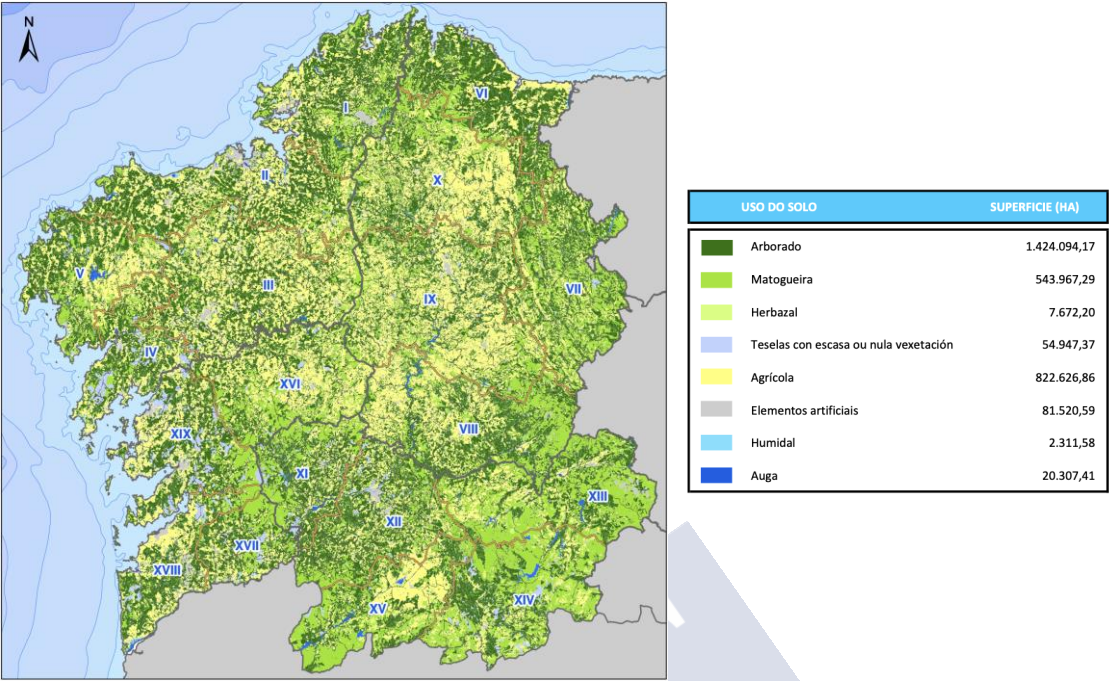


Figura 49: Vegetación - distribución de usos del suelo en Galicia
Modificado por el autor de [168]

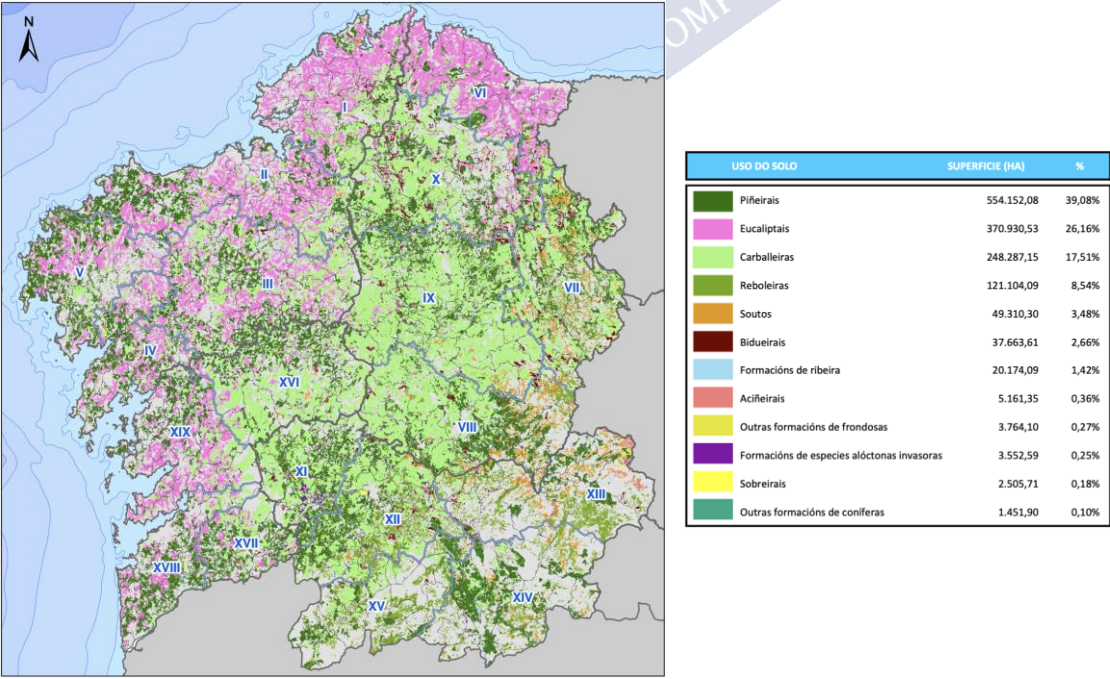


Figura 50: Formaciones forestales dominantes
Modificado por el autor de [168]

Tabla 34: Rendimiento forestal de diferentes tipos de arbolado
Fuente: Ence

Rendimiento Forestal	Eucalipto	Abedul	Pino	Picea	Haya
m3/ha/año	15-30	3-8	2-10	4-10	2-9
turnos (años) de corta	9-14	25-45	75-110	60-80	100-140



Figura 51: Línea eléctrica atravesando una superficie forestal con la biomasa acabada de gestionar y estado transcurridos 3,5 años (autor)

3.4.3. Las métricas de la seguridad energética en el ámbito de la distribución eléctrica

Una de las principales medidas existentes en España asociadas a la seguridad energética son las correspondientes a la medida de la continuidad del suministro eléctrico. Son las relativa al número y duración de las interrupciones del suministro.

Para la medida de la calidad del suministro se establecieron los índices TIEPI y NIEPI que tienen valores máximos en función de las siguientes zonas según se fija en el RD 1955/2000 [179] (Tabla 35):

Tabla 35: Clasificación de zonas para calidad de suministro eléctrico [179]

Zona	Características
Zona Urbana	Municipios con más de 20.000 suministros y capitales de provincia.
Zona Semiurbana	Municipios de 2.000 a 20.000 suministros excluyendo capitales de provincia.
Zona Rural Concentrada	Municipios de 200 a 2.000 suministros.
Zona Rural Dispersa	Municipios de menos de 200 suministros y suministros fuera de núcleos de población.

TIEPI: Tiempo de interrupción equivalente a la potencia instalada:

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \cdot H_i)}{\sum (PI)} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde: $\sum PI_i$ = Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (kVAs), PI_i = Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT afectada por la interrupción i de duración H_i (kVAs), H_i = Tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia PI (horas), K = Número total de interrupciones en el período considerado.

Solo se consideran interrupciones de tiempo superior a tres minutos (Figura 53 y Figura 55). Los límites legales para el TIEPI en cada una de las zonas son las indicadas en la Tabla 36:

Tabla 36: Límite de TIEPI en función de las zonas [179]

Zona	Límite en horas
Zona Urbana	1,50
Zona Semiurbana	3,50
Zona Rural Concentrada	9,00
Zona Rural Dispersa	9,00

Para poder determinar el valor del TIEPI realmente debido al correcto desempeño de la empresa distribuidora este se descompone de la forma indicada en la Figura 52.

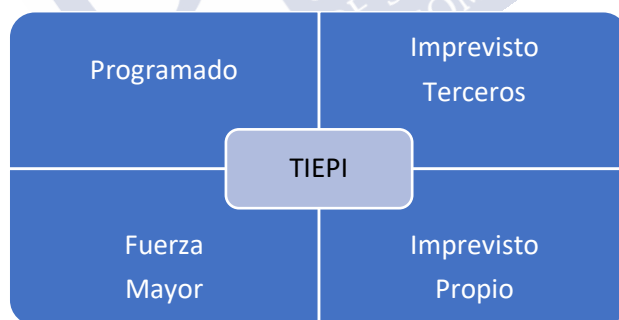


Figura 52: Composición del TIEPI
Elaboración propia a partir de [179]

De estos los que reflejan el comportamiento de la empresa sería el Imprevisto Propio, que fundamentalmente es el debido a averías en la red, y el Programado, que es el debido a trabajos programados de mantenimiento en la red. El Imprevisto de Terceros es el debido a averías causadas por terceros en la red de distribución y el de Fuerza Mayor es el debido a los eventos formalmente declarados por la administración de esta manera (grandes temporales, etc...).

Por otro lado, el NIEPI se define como el número de interrupciones equivalentes a la potencia instalada:

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^K (PI_i)}{\sum (PI)} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde: $\sum PI_i$ = Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (kVAs), PI_i = Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT afectada por la interrupción i (kVAs), K = Número total de interrupciones en el período considerado

Al igual que con el TIEPI solo se consideran interrupciones superiores a tres minutos (Figura 54). Además de la continuidad del suministro también es necesario considerar la calidad del producto que hace referencia a las características de la onda de tensión.

En este sentido la calidad puede verse afectada por:

- Variaciones en el valor eficaz de la tensión.
- Variaciones en la frecuencia.
- Interrupciones en el servicio inferiores a 3 minutos.
- Huecos de tensión. Son reducciones bruscas del valor de la tensión durante un período corto de tiempo (10 ms).
- Distorsión de la onda debido a la introducción de armónicos. Este problema surge desde la introducción masiva de receptores electrónicos conectados a la red.

La norma de referencia para la calidad del producto es la UNE-EN-50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.

Aunque el RD 1955/2000 no lo incluye en este apartado, podemos incluir como calidad del producto el valor eficaz de la tensión en el punto de conexión. En este sentido las variaciones que este reglamento permite son de un 7% respecto a la tensión nominal de la red.

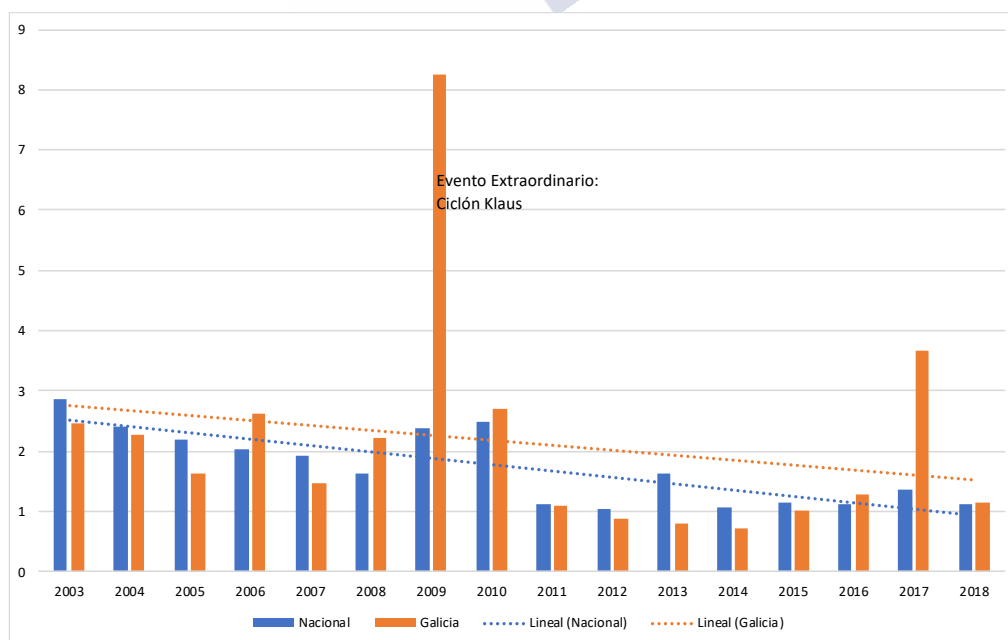


Figura 53: TIEPI Nacional y Galicia (horas)
Elaboración propia a partir de [180]

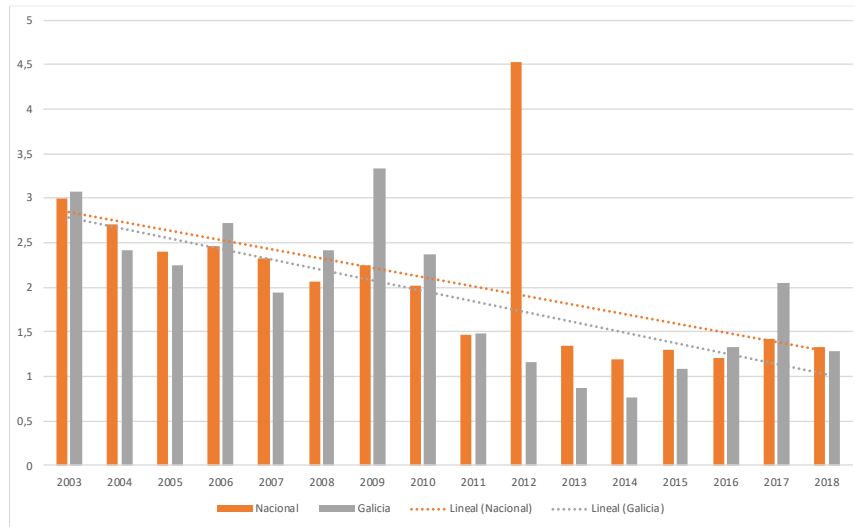


Figura 54: NIEPI Nacional y Galicia
Elaboración propia a partir de [180]

Los índices TIEPI y NIEPI tienen carácter regulatorio en España. A nivel internacional los índices que permiten monitorizar el rendimiento del sistema eléctrico vienen definidos por el estándar P1366 de IEEE: Guía de los índices de fiabilidad de la distribución de electricidad. En él se definen varios índices [181] entre los que destacan los siguientes:

SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) que, de forma análoga al TIEPI representa un índice de indisponibilidad que mide la duración de las interrupciones durante un determinado período de tiempo, pero a diferencia del TIEPI lo relaciona con los clientes totales existentes en la red considerada y no con la potencia instalada:

$$SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_T} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde: r_i = Tiempo de reposición de cada interrupción, N_i = Número de clientes afectados durante la interrupción, N_T = Número total de clientes conectados a la red.

SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) que, de forma análoga al NIEPI mide el número de interrupciones, pero referido tal y como ocurre con el SAIDI al número total de clientes y no a la potencia instalada.

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (\text{Ec. 18})$$

CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*) que indica el tiempo medio de restablecimiento del suministro.

$$CAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{\sum N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (\text{Ec. 19})$$

Estos tres índices están orientados a la percepción del cliente sobre su suministro eléctrico.

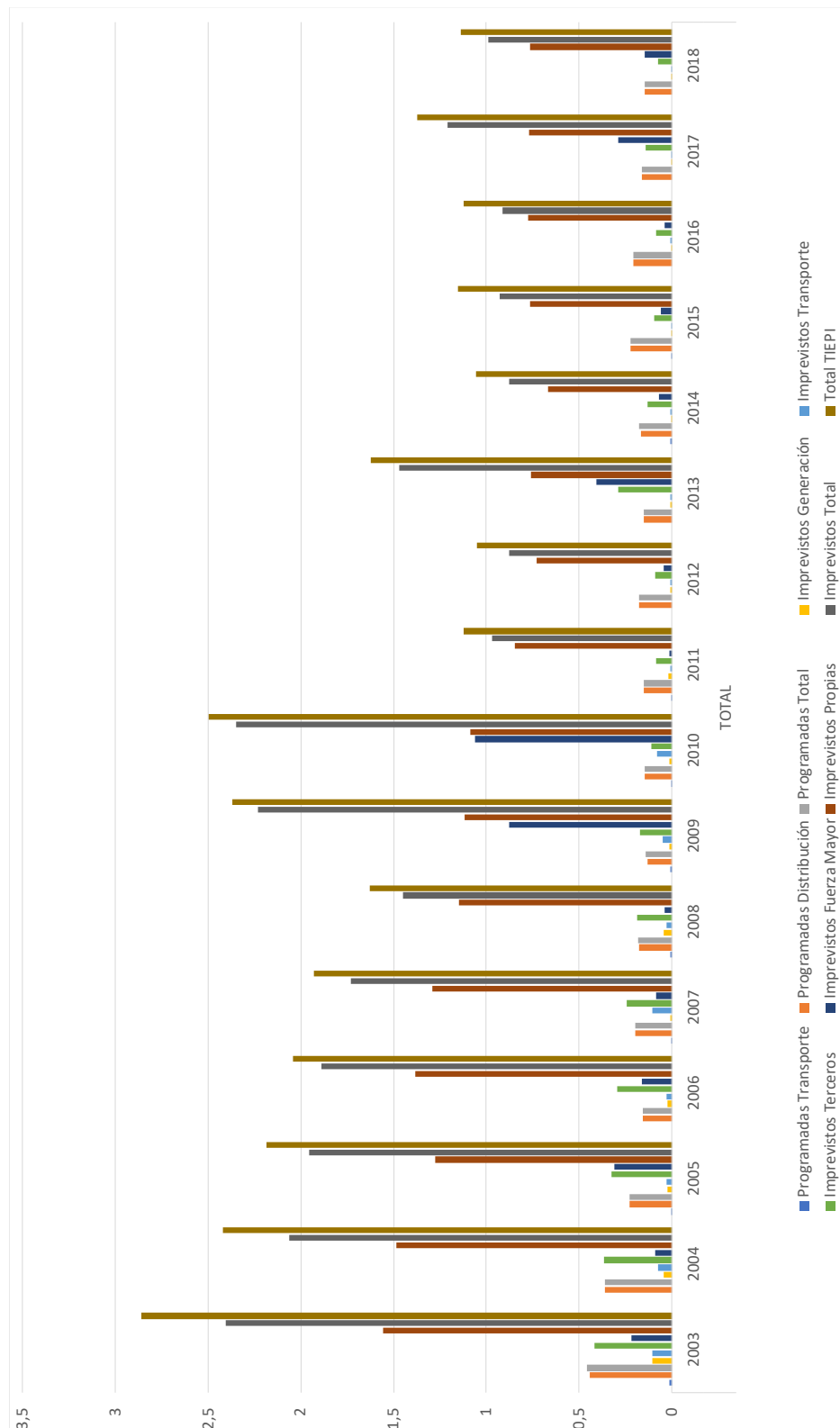


Figura 55: TIEPI Nacional total y desagregado por componentes (horas)
Elaboración propia a partir de [180]

Desde el punto de vista de la carga del sistema, destacan los siguientes índices:

ASIDI (Average System Interruption Duration Index), que representa la duración de las interrupciones con relación a la carga.

$$ASIDI = \frac{\sum r_i L_i}{L_T} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde: L_i = Carga conectada en cada episodio de interrupción, L_T = Carga total conectada en la red.

ASIFI (Average System Interruption Frequency Index), que representa el número de interrupciones con relación a la carga conectada:

$$ASIFI = \frac{\sum L_i}{L_T} \quad (\text{Ec. 21})$$

Como se puede comprobar los índices *ASIDI* y *ASIFI* son análogos a los *SAIDI* y *SAIFI* respectivamente. El uso de los índices relacionados con la carga es útil en los casos en los que predomina una elevada carga de un pequeño número de clientes (por ejemplo, clientes industriales o comerciales).

3.4.4. Nuevas situaciones en la distribución de electricidad

3.4.4.1. La digitalización de la red de distribución

Como sucede en otros ámbitos, la distribución de energía eléctrica está inmersa en proyectos de adaptación a las nuevas necesidades de la sociedad.

Como redes inteligentes o *smart grids* se conocen un conjunto de actuaciones que con la ayuda de las telecomunicaciones y los sistemas de información ayudan a la gestión e integración de los elementos que conforman la red de distribución. Dentro de este concepto se engloban sistemas ya presentes desde hace años como el telecontrol (que hasta ahora se instalaban en lugares estratégicos como subestaciones, determinados centros de transformación o seccionamiento y determinados puntos de líneas aéreas como derivaciones importantes o con problemas recurrentes, pero que se prevé que su uso se extienda mucho más en el futuro próximo), como nuevas necesidades surgidas por cambios legislativos como sistemas de medida que incorporen elementos de telegestión. En este sentido la legislación obligaba a la sustitución de los contadores actuales por otros con capacidad de telegestión antes de finales de 2018 para potencias contratadas iguales o inferiores a 15 kW.

En conjunto el sistema de telegestión está formado por:

- El nuevo contador con capacidad de telegestión.
- El concentrador instalado en el centro de transformación que recopila la información de todos los suministros que se alimentan de él y la transmiten por el sistema de telecomunicaciones elegido (por ejemplo, mediante la red móvil).
- Los sistemas que gestionan la información recogida.

Tabla 37: Normativa sustitución de equipos de contadores (elaboración propia)

Texto Legal	Título
RD 1110/2007	De 24 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.
ORDEN ITC/3860/2007	De 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008.
Orden IET/290/2012	De 16 de febrero, por la que se modifica la Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008 en lo relativo al plan de sustitución de contadores.

La implantación de la telegestión supuso, por lo tanto, la instalación masiva de nuevos contadores en todos los suministros y la instalación de concentradores en los centros de transformación. En muchos casos, sobre todo en los transformadores de intemperie ha supuesto la sustitución completa del cuadro de baja tensión.

El uso de la telegestión inicia la digitalización de la red de distribución y permite:

- La lectura remota de los consumos.
- La realización de forma remota de muchas operaciones realizadas con el suministro como altas, bajas, modificaciones de tarifa, de potencia contratada, ...
- Permite proporcionar datos relevantes sobre el consumo al usuario, ya sea directamente en el contador o bien de forma más fácil con aplicaciones móviles o vía web que las compañías desarrollan y ponen a disposición de sus usuarios.
- Permite desarrollar sistemas de facturación que se puedan adaptar fácilmente a cambios legislativos, pudiendo adaptar las tarifas al precio horario de la electricidad en el mercado.
- Permite mejorar la gestión de incidencias en los suministros.
- Ayuda a la detección del fraude (conexiones ilegales a la red).
- Obtención de información sobre el uso de la energía que una vez tratada sirva para desarrollar sistemas que incrementen la seguridad energética del país.
- Facilita la integración de la producción renovable distribuida dentro del sistema eléctrico.

3.4.4.2. La descentralización de la producción

La grave situación generada a partir del cambio climático hace necesaria la reducción a todos los niveles en la emisión de los gases de efecto invernadero y una de las principales acciones a tomar es un cambio en el modelo energético tendente a implantar una energía cada vez más descarbonizada, lo que implica una tendencia a una mayor electrificación de la sociedad en ámbitos como la movilidad, los procesos industriales, la climatización, etc... en paralelo con un incremento cada vez mayor de producción eléctrica renovable. Para ello será necesaria la adaptación de las redes de distribución, tanto en su capacidad como en la incorporación a mayor escala de elementos de producción eléctrica de pequeña y mediana potencia y también el previsible aumento de la demanda derivado de esta mayor electrificación.

El uso de las redes inteligentes descritas anteriormente también mejorará la integración de los sistemas de generación distribuida (DER, *Distributed Energy Resources*), sobre todo en el caso de aquellos de mediana o pequeña potencia que se conecten directamente a la red de distribución de media o baja tensión. Entre las tecnologías DER se encuentran los sistemas solares fotovoltaicos, la cogeneración (CHP – *Combined Heat and Power*), dispositivos eólicos, almacenamiento de energía, microrredes, vehículos eléctricos, sistemas de gestión de la demanda e incluso hay autores que incluyen dentro de estas tecnologías la eficiencia energética ya que puede ser un

elemento que permita al gestor de la red desplazar en un área determinada la energía procedente de fuentes no renovables [182]. En este sentido, el RD 244/2019 de autoconsumo sustituye a la normativa anterior relativa a este asunto, en concreto el RD 900/2015 y las posteriores modificaciones realizadas en el RDL 15/2018 de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores, de forma que se facilita y simplifica la presencia de estas instalaciones. Es en este RDL en donde se define el autoconsumo como “el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de generación próximas a las de consumo y asociadas a las mismas”, y establece dos modalidades: el autoconsumo con excedentes o sin excedentes en función de si pueden realizar o no vertidos a las redes de distribución (o transporte). Es destacable el concepto de “instalaciones de generación próximas” establecido en la definición, es decir, el hecho de que la generación no tiene necesariamente que estar directamente conectada directamente a la instalación de consumo, sino que puede hacerlo a través de la red de distribución siempre que tanto los consumidores como la producción estén conectadas a la red de baja tensión de un mismo centro de transformación (no necesariamente a la misma línea de baja tensión), o que tanto la generación como los consumidores estén conectados a la red de baja tensión a una distancia entre ellos inferior a 500 m medida en su proyección horizontal en planta o que ambos estén ubicados en la misma referencia catastral. Por último, la producción próxima también se considera en el caso de que la producción y los consumos estén conectados mediante líneas directas (Figura 57).

En muchos ámbitos se consideraba que anteriores normas de autoconsumo, en concreto en el RD 900/2015, obstaculizaban el despliegue de este tipo de instalaciones debido a varias razones. Cuando el autoconsumo estaba conectado a la red participaba en la financiación de los costes del sistema al igual que el resto de los consumidores conectados. Esta participación tenía lugar fundamentalmente por tres vías: 1) Peajes de acceso a las redes, mediante los que se participaba en la cobertura de sus costes, 2) Cargos asociados a los costes del sistema eléctrico, referidos fundamentalmente a la retribución de la producción renovable, la cogeneración de alta eficiencia, la producción extrapeninsular y al déficit de tarifa y 3) Cargos por otros servicios del sistema correspondientes al respaldo que necesita el sistema para garantizar el equilibrio entre la generación y la demanda [183]. Otro aspecto de esta normativa considerado como muy limitante para el desarrollo del autoconsumo era que se impedía que un generador pudiese conectarse a la red interior de varios consumidores. Por último esta normativa establecía cargos sobre la energía autoconsumida (lo que se denominó en muchos ámbitos como “impuesto al sol”), aunque estaban exentos los pequeños consumidores (autoconsumo de tipo 1: con potencia contratada igual o inferior a 10 kW), los sistemas eléctricos aislados del territorio no peninsular (C.A. de Canarias, Ceuta, Melilla, el sistema Ibiza-Formentera y sin exención, pero con reducciones el sistema Mallorca-Menorca) y la cogeneración hasta el 31 de diciembre de 2019. Todas estas limitaciones fueron suprimidas por el RDL 15/2018 y el RD 244/2019: se reconoce el autoconsumo compartido, lo cual es fundamental para el desarrollo de este tipo de instalaciones en situaciones como comunidades de propietarios, polígonos industriales, urbanizaciones o cualquier otro tipo de consumo compartido, se simplifican significativamente los trámites burocráticos en relación a normativas anteriores y se establece un mecanismo de compensación mediante la facturación neta entre la energía excedentaria (generada y vertida a la red) y la consumida de la red, en lo que se denomina “modalidad con excedentes acogida a compensación”, aunque para ello es necesario que la potencia de la producción sea igual o inferior a 100 kW y se deben establecer los contratos definidos en el Real Decreto. El resto de instalaciones se encuadrarían en la denominada “modalidad con excedentes no

acogida a compensación” o aquellos que cumpliendo las condiciones anteriores decidan voluntariamente acogerse a esta modalidad. Puede incluso establecerse un mecanismo de compensación en autoconsumidores sin excedentes en el caso de autoconsumo colectivo. En el caso de que el suministro de autoconsumo sea sin excedentes es necesaria la instalación de un mecanismo antivertido que impida el vertido de eventuales excedentes a la red.

Otro aspecto relevante a nivel técnico es la modificación que el RD 244/2019 hace de la ITC-BT-40 del Reglamento de baja tensión, de forma que las instalaciones de producción deben conectarse a un circuito independiente excepto en potencias de hasta 0,8 kVA, en el que se permite una instalación enchufable sin intervención de instaladores autorizados. También se regula los requisitos de los sistemas antivertidos y permite conexiones monofásicas en potencias de hasta 15 kW si la red interior también es monofásica.

Más allá del indudablemente fundamental desarrollo normativo, el despliegue a gran escala de la producción distribuida tendrá éxito en la medida en la que el coste de las tecnologías se sitúe a niveles que permitan rentabilidad económica frente a la conexión convencional a la red (Figura 56). En este aspecto, el coste de las tecnologías eólica y fotovoltaica han descendido en un entorno del 40% y del 60% respectivamente entre 2008 y 2014. En el caso de la tecnología eólica se espera una reducción de un 30% adicional en 2030 [184]. Paralelamente otras tecnologías que facilitan la adopción de autoconsumo renovable como es el caso de la iluminación LED y baterías de almacenamiento han experimentado reducción de costes del entorno del 90% y 70%, con reducciones anuales en el caso de las baterías del 14% [184].

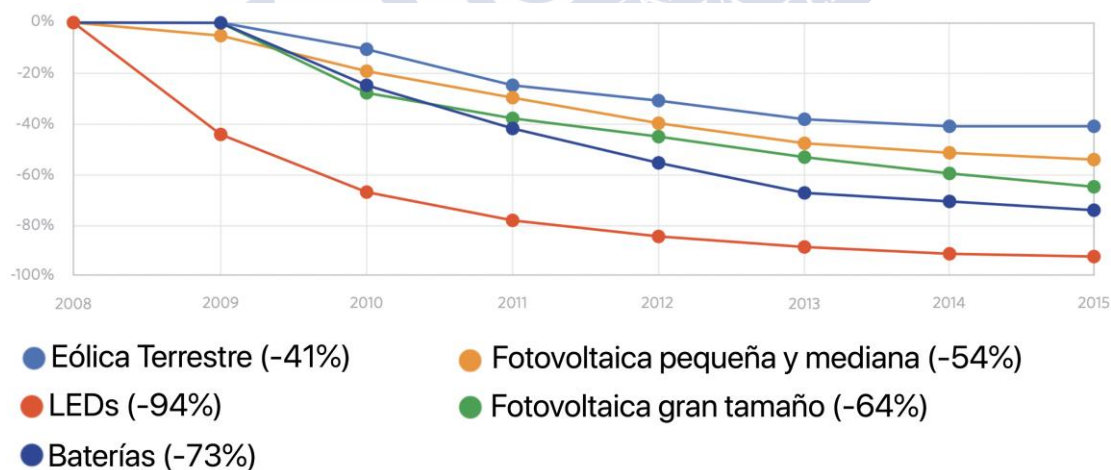


Figura 56: Reducción de costes en tecnologías clave para el despliegue de la producción distribuida
Modificado por el autor de [184]

AUTOCONSUMO INDIVIDUAL O COLECTIVO			
RED INTERIOR	SIN EXCEDENTES	COLECTIVO	ACOGIDA A COMPENSACIÓN
		INDIVIDUAL	
	CON EXCEDENTES	INDIVIDUAL	ACOGIDA A COMPENSACIÓN $P \leq 100$ kW (renovables) Un único contrato
		INDIVIDUAL	NO ACOGIDA A COMPENSACIÓN
A TRAVÉS DE RED		COLECTIVO	
		INDIVIDUAL	
Conectado a la red de baja tensión del mismo centro de transformación y/o con distancias producción-consumo inferiores a 500m y/o misma referencia catastral (14 dígitos)	CON EXCEDENTES	INDIVIDUAL	NO ACOGIDA A COMPENSACIÓN
		COLECTIVO	

Figura 57: Modalidades de autoconsumo
Elaboración propia a partir de [185]

3.4.4.3. La integración de las energías renovables y su relación con la seguridad energética

Como ya se ha indicado anteriormente uno de los principales aspectos a desarrollar en torno a la seguridad y sostenibilidad energética consiste en aumentar los recursos energéticos propios como medida, en compañía de otras, de reducción de la dependencia exterior. En países como el nuestro con recursos energéticos primarios convencionales limitados, teniendo en cuenta además nuestros compromisos en materia climática, este aumento pasa por un fuerte desarrollo de las energías renovables. A 31 de diciembre de 2018 el 46,7% de la potencia instalada en la generación es renovable, lo que suponen 48.612 MW renovables de los 104.094 MW totales de producción instalada [112]. Este porcentaje, aunque significativo, realmente lleva prácticamente estancado de 2012, año en el que tuvo lugar el último incremento significativo respecto al año anterior. De entre las renovables destacan claramente la eólica y la hidráulica con un 22,6% y 16,4% de la potencia total instalada [112]. En lo que se refiere a la producción de energía, en 2018 el 38,4% procede de fuentes renovables [112]. Esta diferencia entre el porcentaje de potencia instalada y producida nos lleva a realizar un análisis detallado de esta relación para cada una de las fuentes. Analizando los datos podemos comprobar que en la actualidad todavía se obtiene una mayor producción de cada cifra porcentual de potencia instalada no renovable que de la renovable (1,16 en el caso de la no renovable frente a 0,82 de las renovable), destacando positivamente por su rendimiento en este sentido la energía nuclear con un valor de 3 y negativamente los ciclos combinados con un 0,45 (Figura 58). Estos resultados son consecuencia de diversos factores, algunos de ellos derivados de la propia naturaleza de las fuentes cuya producción depende de la meteorología (eólica, hidráulica y solar) que les confiere una característica intrínseca de variabilidad (Figura 59).

Esta característica podría verse mitigada con el desarrollo e introducción de sistemas de almacenamiento a gran escala, que pudiesen almacenar energía en momentos de exceso de producción para posteriormente liberarla. Sin embargo, este exceso de producción podría también ser utilizado, como veremos más adelante, para la producción de hidrógeno mediante electrólisis que sería utilizado como combustible o como parte de

los procesos de utilización de CO₂ que sirvan como mitigador de emisiones. Otro factor que afecta es el precio al que el mercado adquiere la energía lo que hace a cada fuente más o menos rentable en función del coste de su combustible y por último tenemos como factor la política energética que establece prioridades de despacho.

Este desarrollo de las fuentes renovables debe ir acompañado de las medidas necesarias para la integración de estas en el sistema energético y para dicha integración, además de los condicionantes técnicos, deben ser tenidos en cuenta las cuestiones relacionadas con la seguridad energética. Para ello es necesario evaluar los riesgos existentes en dicha integración. Estos riesgos pueden tener carácter local, regional, nacional e internacional y tienen distinta naturaleza.

A nivel económico es necesario evaluar cómo una posible integración a gran escala de pequeños productores puede afectar a la industria energética existente, que independientemente de la entrada de estos pequeños productores, seguirá llevando el peso de la infraestructura energética básica de los países. En definitiva, las grandes producciones renovables no serían un problema para la industria, en tanto que esta puede entrar a desarrollar sus propios proyectos, pero está por ver el posible impacto de la pequeña producción.

Tipo	Fuente	h	% instalado	% generado
No Renovables	Bombeo puro	0,25	3,20	0,80
	Nuclear	3,00	6,80	20,40
	Carbón	1,49	9,60	14,30
	Fuel+gas	1,08	2,40	2,60
	Ciclo combinado	0,45	25,30	11,50
	Cogeneración	2,02	5,50	11,10
	Residuos no renovables	1,80	0,50	0,90
	No renovables	1,16	53,30	61,60
Renovables	Hidráulica	0,80	16,40	13,10
	Eólica	0,84	22,60	19,00
	Solar fotovoltaica	0,67	4,50	3,00
	Solar térmica	0,77	2,20	1,70
	Resto de renovables	1,70	1,00	1,70
	Renovables	0,82	46,70	38,50

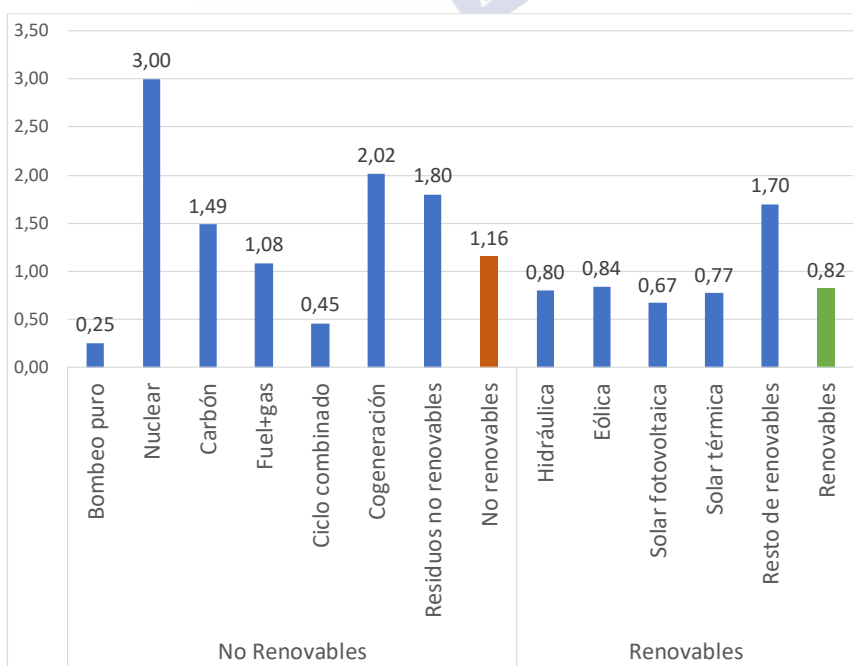
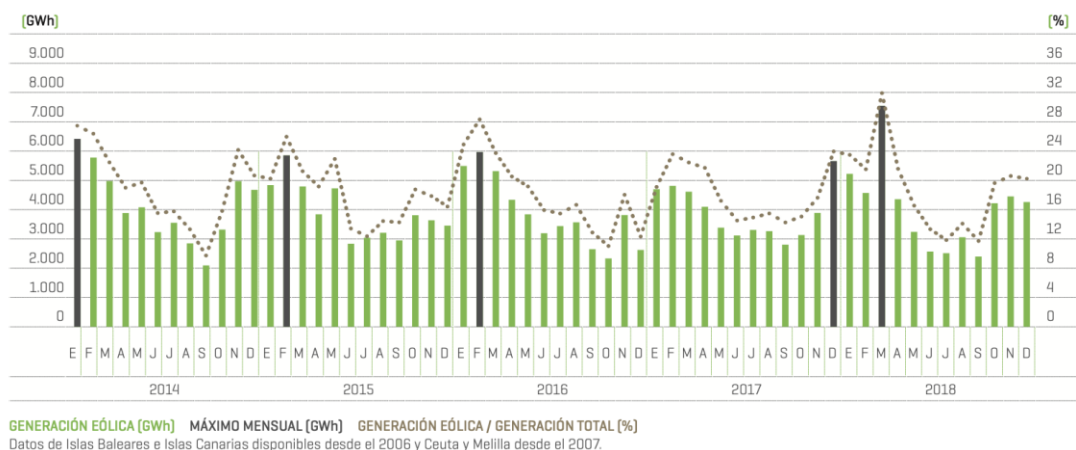
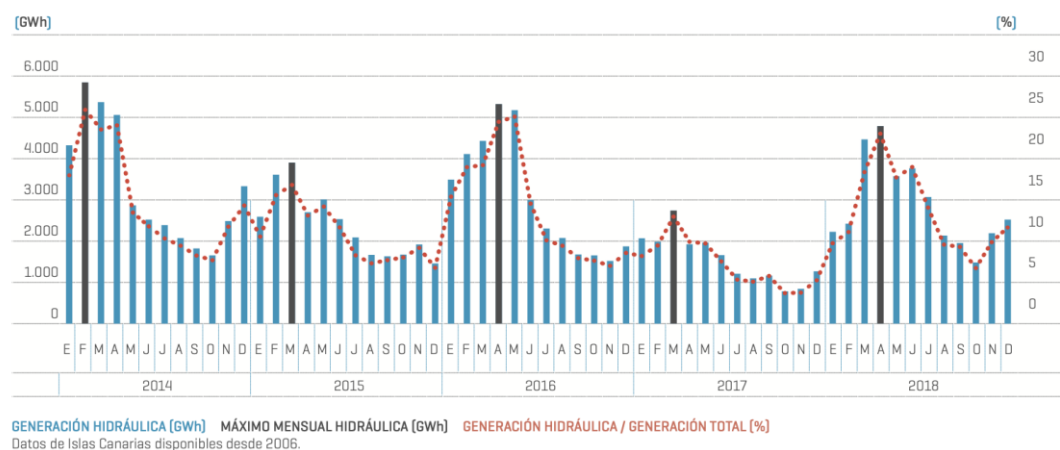


Figura 58: Potencia instalada y producida por fuentes y relación producción/potencia instalada
Elaboración propia a partir de [112]

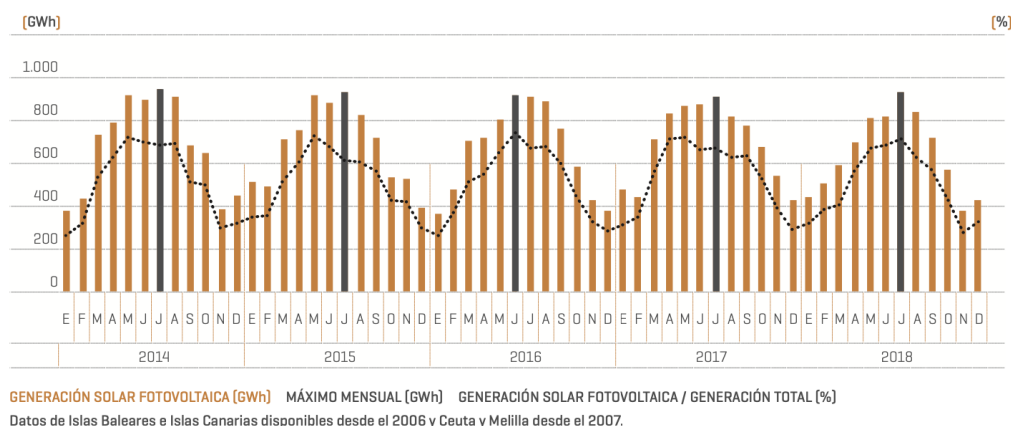
Generación eólica nacional, máximos mensuales y participación en la generación total. Sistema eléctrico nacional



Generación hidráulica, máximos mensuales y participación en la generación total. Sistema eléctrico nacional



Generación solar fotovoltaica, máximos mensuales y participación en la generación total. Sistema eléctrico nacional



Fuente: Red Eléctrica de España. <http://www.ree.es>

Figura 59: Distribución a lo largo del año de la producción eólica, hidráulica y solar Fotovoltaica
[112]

A nivel técnico es necesario tener en cuenta el carácter muy variable de algunas fuentes renovables, que además ya en la actualidad constituyen un porcentaje muy importante de la producción, como es el caso de la energía eólica. Será necesario, por lo tanto, establecer mecanismos de flexibilidad en el sistema energético que aseguren el suministro en los períodos de baja producción renovable. Esto nos puede llevar a la infrautilización de costosas infraestructuras (tanto a nivel de instalación como de mantenimiento) lo que nos vuelve a llevar a su vez a un riesgo económico. Hemos podido ver ya esta situación con la infrautilización de centrales de ciclo combinado de reciente construcción que no podían evacuar su producción debido a la prioridad de despacho de la energía de fuentes renovables, sobre todo eólica. La situación de la producción convencional puede ser todavía más delicada con el desarrollo futuro de sistemas de almacenamiento. Con el fin de mantener la sostenibilidad del sistema es necesario el establecimiento de marcos regulatorios que tengan la suficiente estabilidad para el desarrollo de las inversiones necesarias. A partir de estos marcos regulatorios los sistemas de control podrán establecer los flujos de entrada de energía al sistema ayudados además por el incremento de la digitalización de los procesos y de la utilización de tecnologías basadas en *big data*. El tratamiento de la información procedente de procesos de digitalización puede ser una herramienta fundamental para la integración de las fuentes renovables en el sistema de forma que ayude a sacar el mayor rendimiento posible a la potencia instalada. Los datos a procesar serían los procedentes de equipos de medida digitales (contadores), de un aumento en la sensorización de diferentes partes del sistema energético y de otros elementos de predicción, como predicción meteorológica y predicción del comportamiento de los mercados tanto en lo que se refiere a la demanda de energía y del precio de las materias primas (Figura 60).

Esta flexibilidad tiene diferentes significados en función de la escala de tiempo que se tenga en cuenta, con problemas específicos y sistemas diferentes afectados, yendo desde alteraciones en parámetros de funcionamiento de sistemas energéticos en el caso de las escalas de tiempo más pequeñas hasta afecciones en la planificación energética en las escalas de tiempo más grandes. La Agencia Internacional de la Energía propone hasta 6 escalas de tiempo que van desde fracciones de segundo/segundo a meses/años [186].

Los problemas asociados a la flexibilidad de los sistemas tendrán afecciones relacionadas con las diferentes escalas de tiempo en función de la magnitud del despliegue de las energías renovables en el sistema, de forma que en situaciones poco maduras de implantación de renovables o no hay afección o bien se afecta a las situaciones de muy corta escala de tiempo, mientras que en fases muy avanzadas los problemas que afectan a las escalas de tiempo más largas son las más afectadas [186].

Algunos de los síntomas de falta de flexibilidad de los sistemas son, a nivel técnico, la dificultad para equilibrar el suministro y la demanda de energía, recortes significativos en determinadas fuentes de energía, sobre todo en períodos de baja demanda ante la dificultad de la puesta en marcha de determinadas tecnologías que son fundamentales para el funcionamiento del sistema y desviaciones sobre la entrada planificada de las diferentes fuentes. A nivel económico en los mercados de energía la volatilidad de los precios e incluso precios negativos son síntomas de falta de flexibilidad de los sistemas [187].

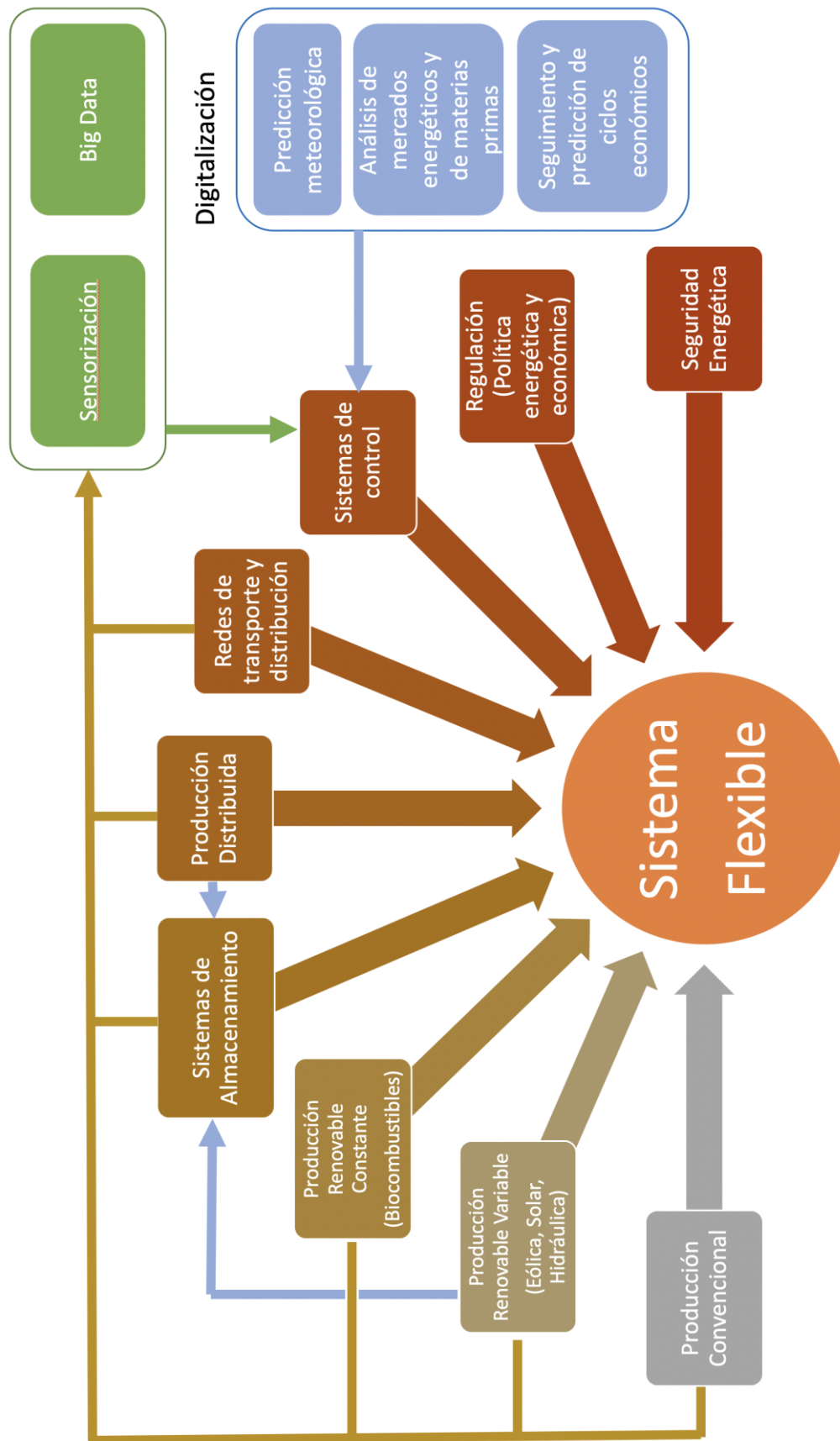


Figura 60: Integración de los recursos energéticos distribuidos y flexibilidad del sistema (elaboración propia)

Es posible elaborar diferentes formas de medir la flexibilidad del sistema partiendo de situaciones más elementales que den una estimación rápida hacia análisis más sofisticados, de forma que una métrica inicial podría ser el porcentaje de potencia instalada de cada fuente con relación al pico de demanda, para pasar a otro más elaborado consistente en los cambios máximos en la relación oferta/demanda de energía que el sistema es capaz de asumir partiendo de una determinada situación inicial en un determinado horizonte temporal. Por último, una métrica que ya supone un amplio conocimiento del sistema sería el porcentaje esperado de incidentes en un determinado período de tiempo cuando el sistema no puede asumir cambios en la carga neta [187]. El uso combinado de diferentes métricas determina diferentes marcos que permiten evaluar la flexibilidad de los sistemas.

Un aspecto muy destacado en la incorporación de las tecnologías DER al sistema eléctrico y que está directamente relacionado con la seguridad energética es la protección contra los ataques informáticos a la red. Generalmente, sobre todo en los estados iniciales del despliegue los aspectos relacionados con la ciberseguridad no son prioritarios [126]. Sin embargo, ya se han producido ataques de este tipo sobre infraestructuras energéticas por lo que se requiere la adopción de medidas que pueden ir desde un marco básico de seguridad hasta sistemas más avanzados en función de la entidad de la instalación.



Figura 61: Ciberseguridad asociada al despliegue de la producción distribuida
Elaboración propia a partir de [126]

3.4.5. El uso del SF₆ en el transporte y distribución de electricidad

El inicio en el uso del hexafluoruro de azufre en las redes de transporte y distribución de electricidad supuso un gran avance tecnológico en estas infraestructuras. Permitió el diseño de elementos de maniobra más seguros de operar, mucho más compactos, mejoró la modularidad en el diseño de instalaciones y facilitó la automatización primero de elementos clave de la red de distribución y posteriormente extenderla de forma más generalizada. De hecho, es el estándar actual en las redes de distribución. Sin embargo, la toma en conciencia por parte de la sociedad y de las instituciones del problema del calentamiento global supuso la necesidad de tener en consideración los problemas ambientales que sobre este aspecto tiene el SF₆, con un GWP (*Global Warming Potential*) de 23.500 a 100 años y una permanencia en la atmósfera de 3.200 años.

3.4.5.1. Generalidades sobre el SF₆

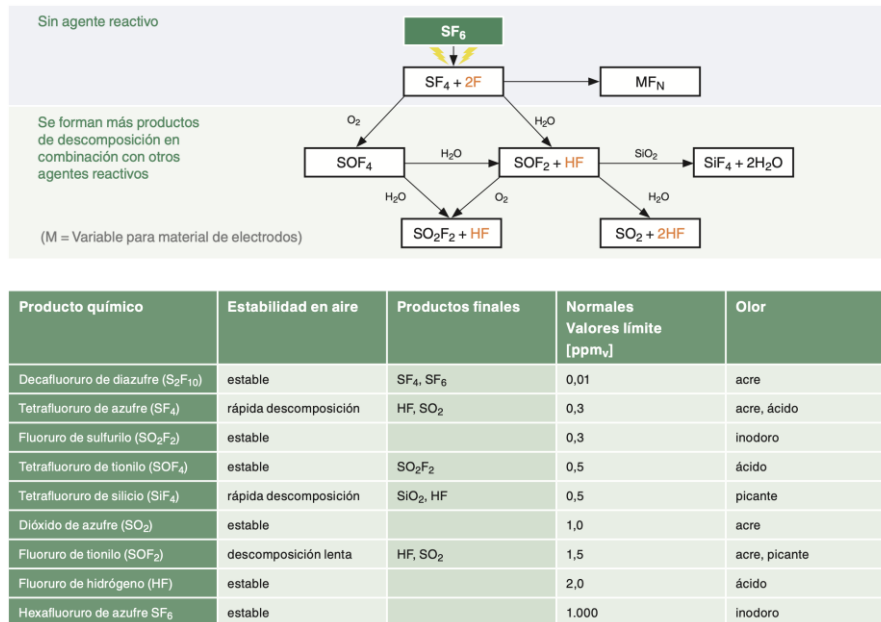
Para evitar que se produzca el arco eléctrico entre los extremos del elemento de maniobra debido a la ionización del aire entre ellos es necesario que el corte se produzca en condiciones que permitan la extinción del arco, ya sea porque la rapidez en la acción del elemento impide esta ionización o bien porque el corte se hace en un medio que extingue el arco que pudiera producirse. Este medio puede ser el vacío, aceite mineral y desde hace años la tecnología implantada de forma generalizada es la extinción mediante hexafluoruro de azufre (SF₆). Las dos grandes ventajas obtenidas de la utilización del SF₆ en la distribución eléctrica han sido por un lado la fabricación de equipos mucho más sencillos y seguros de operar y por otro lado unos equipos mucho más compactos que reducen el espacio y facilitan el diseño modular de las instalaciones.

La capacidad de extinción del arco del SF₆ es debido a la elevada electronegatividad que tiene el compuesto, que le proporciona fundamentalmente el flúor. Con ello se consigue una rápida recuperación de aislamiento entre los contactos, no solo para la tensión de trabajo de los equipos, sino para los altos valores transitorios de la tensión durante las maniobras o disparos. Durante la extinción del arco, a temperaturas de entre 15.000 y 20.000 K, el gas se descompone (Figura 62), pero en torno a un 99% del mismo se vuelve a recombinar para formar de nuevo SF₆. Si existen impurezas pueden generarse pequeñas cantidades de subproductos, que permanecen confinados en las cámaras de los equipos sin que supongan ningún problema para su funcionamiento.

Las características dieléctricas hacen que el hexafluoruro de azufre se utilice también como aislante en diversos equipos eléctricos tanto los elementos de maniobra como en transformadores de medida, embarrados y aisladores. Además de las propiedades dieléctricas, las principales características químicas y físicas del gas son las siguientes:

- Incoloro.
- Inodoro.
- No tóxico.
- No corrosivo.
- Inerte hasta 500°C ya que puede calentarse sin descomponerse hasta esta temperatura y no reacciona con cloro, nitrógeno u oxígeno.
- Es insoluble en el agua y no le atacan los ácidos.
- Es un gas pesado con una densidad aproximadamente 5 veces la del aire.
- Su calor específico por unidad de volumen es 3,7 veces mayor que el del aire en relación a su masa específica, lo que disminuye el calentamiento del equipo eléctrico.

- La conductividad térmica es a temperatura ambiente es similar a la del aire. Sin embargo, presenta un pico a la temperatura de disociación del SF₆ (2100 a 2500 K.). Esto favorece la extinción del arco mediante enfriamiento térmico al producirse una descarga rápida del calor desde el medio caliente al frío después de una importante absorción de calor tras la descomposición de la molécula en la periferia del arco.



Fuente: WIKI, https://www.wiki.es/upload/BR_SF6Gas_es_es_58742.pdf

Figura 62: Productos de descomposición del SF₆ por la acción del arco eléctrico [188]

La implantación de equipos con tecnología SF₆ ha sido masiva (Figura 63). Aunque pueda parecer que las curvas, tanto de toneladas instaladas como de incremento respecto a 1990, vayan a alcanzar la saturación esto puede ser engañoso. En muchas redes de distribución hasta la fecha se han automatizado sobre todo puntos de especial relevancia (por ejemplo, nodos y algún otro punto singular e intermedio). Sin embargo, las empresas propietarias de las redes ya han iniciado fuertes inversiones en la automatización masiva de centros de transformación que en muchos casos requerirá de la sustitución de los equipos actuales por equipos modulares en SF₆ que permitan su motorización para que puedan ser automatizables, por lo que podemos esperar nuevos aumentos significativos en la cantidad de SF₆ presente en equipos instalados en funcionamiento.

3.4.5.2. Impacto ambiental y normativa

En el uso del SF₆ hay que tener en cuenta que, al igual que el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el trifluoruro de nitrógeno (NF₃), figura entre los gases de efecto invernadero recogidos en el protocolo de Kyoto, por el que los firmantes se comprometían a la reducción de estos gases en, al menos un 5% respecto al nivel de 1990 en el período 2008-2012. Aunque la actividad del sector eléctrico a la que el protocolo exigía reducción de emisiones es la producción de electricidad y no figura el transporte y la distribución, posteriormente han surgido diferentes normativas que regulan el uso del SF₆:

- Reglamento (CE) 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero y por el que se deroga el Reglamento (CE) nº 842/2006.
- REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2015/2066 DE LA COMISIÓN de 17 de noviembre de 2015 por el que se establecen, de conformidad con el Reglamento (UE) no 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo, los requisitos mínimos y las condiciones para el reconocimiento mutuo de la certificación de las personas físicas que lleven a cabo la instalación, revisión, mantenimiento, reparación o desmontaje de los conmutadores eléctricos que contengan gases fluorados de efecto invernadero o la recuperación de los gases fluorados de efecto invernadero de los conmutadores eléctricos fijos.
- Real Decreto 115/2017, de 17 de febrero, por el que se regula la comercialización y manipulación de gases fluorados y equipos basados en los mismos, así como la certificación de los profesionales que los utilizan y por el que se establecen los requisitos técnicos para las instalaciones que desarrollen actividades que emitan gases fluorados.

Esta normativa establece las condiciones de confinamiento y recuperación del gas, así como la formación y cualificación del personal implicado y responsabiliza a los usuarios de equipos de media y alta tensión de la aplicación de la normativa y su necesidad se justifica en el hecho de que el valor del GWP para el SF₆ es de 23.500 a 100 años [189] (tomando como GWP del CO₂ la unidad). Además de la reglamentación de obligado cumplimiento se ha firmado en 2008 un acuerdo voluntario entre el Ministerio de Medio Ambiente, los fabricantes y proveedores de equipos eléctricos que usan SF₆ (representados por la entidad SECORBE) y las compañías de transporte y distribución de energía eléctrica, representadas por UNESA y REE para la limitación de emisiones de SF₆ con el objeto fundamental de establecer tecnologías de descontaminación una vez finalizada la vida útil de los equipos, ya que esta es la parte más sensible del uso del SF₆ sobre todo en la actividad de distribución de electricidad [190]. Esto es debido a que sobre todo en el rango de media tensión los equipos utilizan dispositivos sellados, es decir, la carga del gas viene de fábrica y no existen operaciones de llenado o mantenimiento (más allá de la comprobación de la presión del gas) durante la vida útil del equipo. En los equipos de alta tensión sí tienen lugar operaciones de mantenimiento que conllevan la manipulación del gas. Posteriormente en 2015 se firma un nuevo acuerdo voluntario, con vigencia de cinco años (hasta el 31/12/2020), entre el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, los fabricantes, las compañías eléctricas y los gestores autorizados de residuos, tanto del gas como de los equipos que lo contienen para una gestión integral del uso del SF₆ en la industria eléctrica más respetuosa con el medio ambiente [191]. Ambos acuerdos tienen en común las actuaciones necesarias para la minimización de emisiones, estableciendo los límites indicados en la Tabla 38.

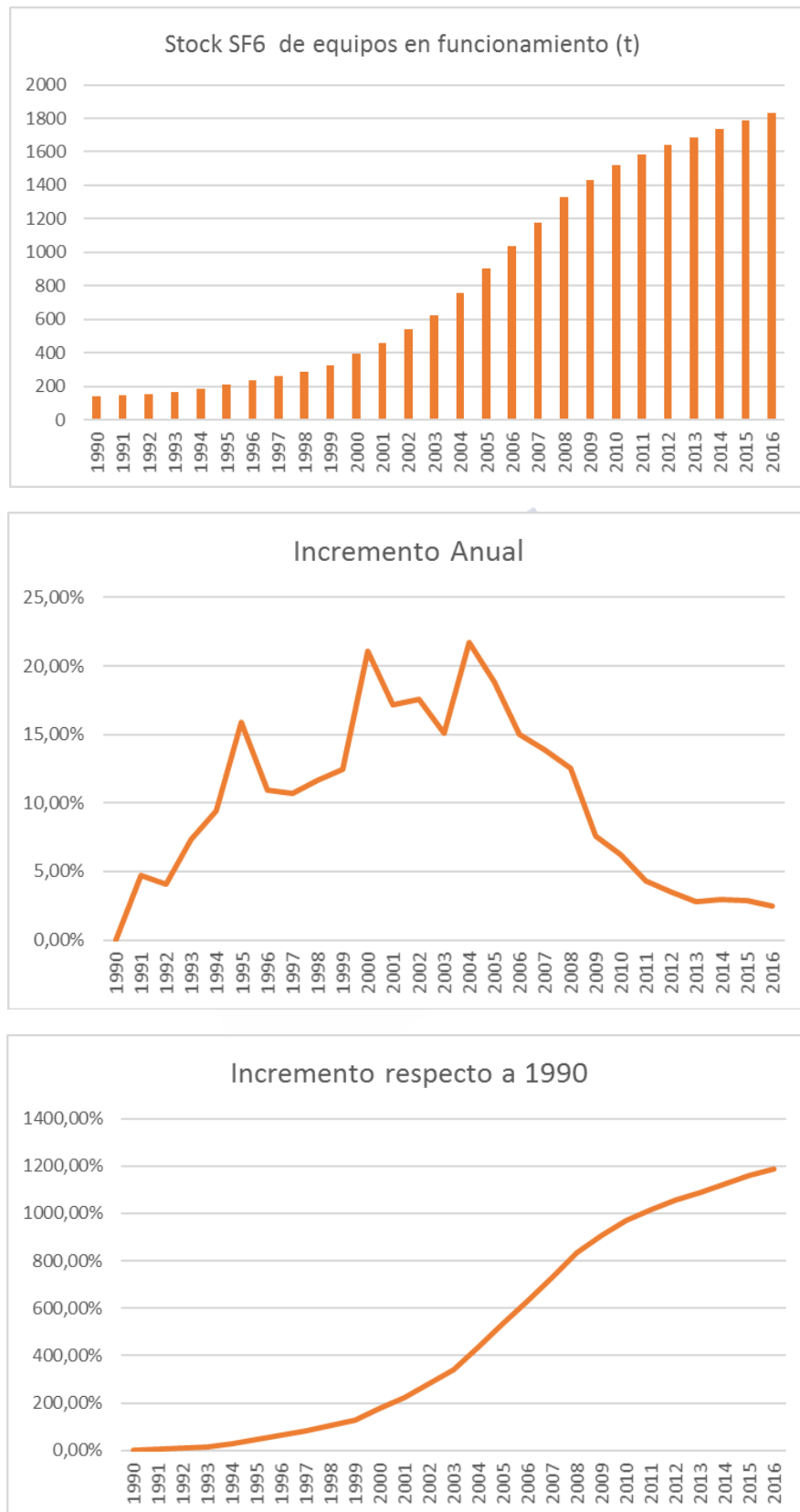


Figura 63: Evolución de la cantidad de SF₆ existente en equipos en funcionamiento
Elaboración propia a partir de [192]

Como se ha indicado anteriormente, el hexafluoruro de azufre es un potente gas de efecto invernadero con un valor de GWP de 23.500. Aunque en su uso en la red de distribución en la gran mayoría de dispositivos permanece confinado durante toda la vida útil del equipo, el elevado GWP del SF₆ nos tiene que hacer ver la utilización de este gas desde el punto de vista del ciclo de vida de los dispositivos. El enfoque de ciclo de vida (LCT – *Life Cycle Thinking*) es una de las herramientas de mayor impacto de las derivadas del concepto de desarrollo sostenible y ayuda a tener en cuenta los recursos consumidos y los impactos ambientales asociados al suministro, uso y final de la vida útil de los productos [193] desde la producción del gas, su transporte, el proceso de fabricación de los dispositivos, el transporte de estos dispositivos, su uso, su mantenimiento, su retirada y la gestión de los residuos.

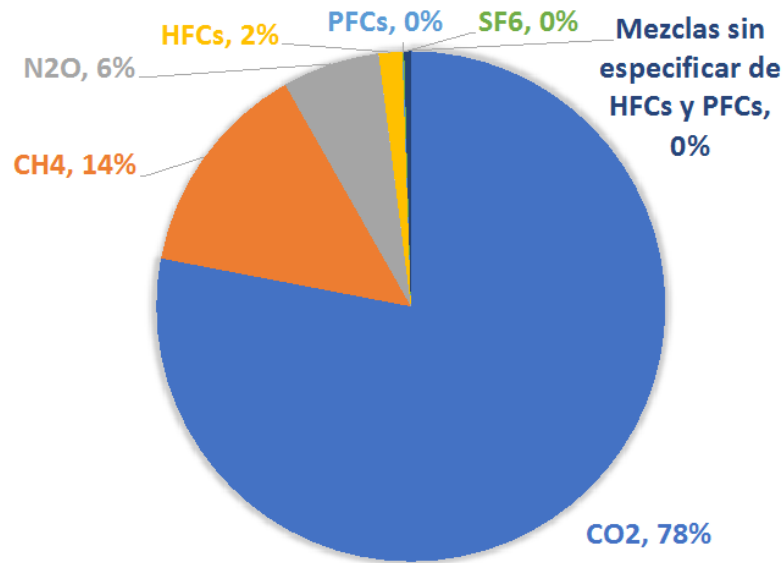
No obstante, en lo que respecta a España, el SF₆ tiene muy poco peso en el cómputo global de las emisiones de gas de efecto invernadero. En el año 2018 las emisiones de este gas fueron de 225,60 kt eq. CO₂, suponiendo un 0,08% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (Figura 64) [194].

Tabla 38: Límites de emisiones en las diferentes fases del ciclo de vida de los equipos
Elaboración propia a partir de [190], [191]

	Instalación		Servicio		Mantenimiento		Fin de Vida	
	2008	2015	2008	2015	2008	2015	2008	2015
Equipos con sistemas de presión cerrados	0,2 %	0,15%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%	1%	1%
Equipos con sistemas de presión sellados	0%	0%	0,1%	0,1%	0%	0%	2%	2%

3.4.5.1. Manipulación del SF₆ en los equipos de transporte y distribución eléctrica

El manejo tiene lugar exclusivamente en los sistemas cerrados, usados fundamentalmente en equipos de alta tensión (considerados en el ámbito de los equipos de SF₆ mayores de 52 kV). La filosofía del manejo es que en la línea de la reglamentación sobre gases de efecto invernadero se debe minimizar en lo posible la emisión del SF₆. En este sentido, a partir de los trabajos de mantenimiento preventivo de las instalaciones con equipos de SF₆ se realiza la comprobación periódica del cumplimiento de las especificaciones para el gas en la norma IEC 60376 [195] que fija parámetros para la cantidad de aire, de CF₄, agua, aceite, acidez HF. De no cumplir las especificaciones se puede realizar el tratamiento in situ de acuerdo con la norma IEC 60480 [196] o si no es posible su traslado a un productor de SF₆ de acuerdo a la norma IEC 62271-4 [197] que, preferentemente reprocesará el gas de forma que cumpla los parámetros de la IEC 60376 o, en el caso de que la recuperación no sea posible (no conforme a IEC 62271-4), procederá a su destrucción mediante incineración. Las operaciones de manejo del SF₆ se realizan con equipos especializados de medición, extracción y almacenaje.



Gas	kTn eq. CO ₂	%
CO ₂	230206,60	78,01%
CH ₄	40606,20	13,76%
N ₂ O	18288,00	6,20%
HFCs	4407,40	1,49%
PFCs	129,70	0,04%
SF ₆	225,60	0,08%
Mezclas sin especificar de HFCs y PFCs	1235,90	0,42%
NF ₃	NA	NA

Figura 64: Emisiones netas de gases de efecto invernadero España (2018). kt eq CO₂ y %
Elaboración propia a partir de [194]

3.4.5.2. Manipulación del SF₆ en los equipos de transporte y distribución eléctrica

El manejo tiene lugar exclusivamente en los sistemas cerrados, usados fundamentalmente en equipos de alta tensión (considerados en el ámbito de los equipos de SF₆ mayores de 52 kV). La filosofía del manejo es que en la línea de la reglamentación sobre gases de efecto invernadero se debe minimizar en lo posible la emisión del SF₆. En este sentido, a partir de los trabajos de mantenimiento preventivo de las instalaciones con equipos de SF₆ se realiza la comprobación periódica del cumplimiento de las especificaciones para el gas en la norma IEC 60376 [195] que fija parámetros para la cantidad de aire, de CF₄, agua, aceite, acidez HF. De no cumplir las especificaciones se puede realizar el tratamiento in situ de acuerdo con la norma IEC 60480 [196] o si no es posible su traslado a un productor de SF₆ de acuerdo a la norma IEC 62271-4 [197] que, preferentemente reprocesará el gas de forma que cumpla los parámetros de la IEC 60376 o, en el caso de que la recuperación no sea posible (no conforme a IEC 62271-4), procederá a su destrucción mediante incineración. Las operaciones de manejo del SF₆ se realizan con equipos especializados de medición, extracción y almacenaje.

3.4.5.3. Eliminación de los equipos que han contenido SF₆ al final de su vida útil

En el marco del acuerdo voluntario de 2015 se ha desarrollado un protocolo de eliminación de residuos de descomposición sólidos de SF₆ de los equipos eléctricos que lo han contenido al final de su vida útil [198] válido desde el 28/09/2017. Este protocolo debe ser aplicado a todos aquellos equipos que hayan contenido SF₆ excepto en los que haya evidencias inequívocas de que no haya tenido lugar un arco eléctrico en su interior. Esto es así debido a que si no ha habido arco eléctrico no hay subproductos de la descomposición del SF₆ debido a este (Figura 65).

3.4.5.4. Las alternativas al SF₆

Los problemas ambientales del SF₆ han supuesto que la industria inicie la búsqueda de gases o mezcla de gases que lo sustituyan. Estos han de tener unas características [199] eléctricas (rigidez dieléctrica, capacidad de extinción del arco) comparables a las del SF₆, unas características ambientales que lo mejoren (bajo índice de potencial de calentamiento global GWP), sin potencial de agotamiento del ozono (ODP) ni contaminante del agua) y unas aceptables características de seguridad para la salud (baja o nula toxicidad, no carcinogénico, no mutagénico, sin incidencia en la reproducción o que provoque la generación de metabolitos tóxicos). En este sentido, por ejemplo, el yoduro de metilo o trifluoroyodometano, CF₃I, tiene unas muy buenas características eléctricas pero es sospechoso de carcinogénico de categoría 2 [200] [201].

A nivel operativo los sustitutos del SF₆ deberían ser seguros de operar y mantener (en lo que respecta a la inflamabilidad, explosividad, corrosión), no degradar los materiales que forman parte de la aparamenta y estar disponibles en el mercado a un precio razonable. Entre las sustancias en estudio se encuentra el gas con denominación HFO1234zeE (Tabla 39) [202].

Como podemos ver en la Tabla 40 donde se resumen tecnologías presentadas recientemente como sustitutos del SF₆, en lo que respeta al corte y extinción del arco se opta mayoritariamente por interruptores de vacío, excepto para tensiones a partir de 170 kV. Para el aislamiento está muy presente el aire sobre todo para tensiones bajas. Para las tensiones más altas, encontramos fluorocetona (iC₅F₁₀O) y fluoronitrilo (iC₄F₇N), debido, por un lado a la mayor necesidad de volumen de la aparamenta para aislar con aire a esos niveles de tensión y por otro lado a la mayor toxicidad de estas sustancias respecto al SF₆ lo que supone un problema para su uso en la distribución secundaria ya que esta infraestructura está muy expuesta a la población en general [203].

Tabla 39: Características del gas HFO1234zeE y comparación con el SF₆ [202]

CARACTERISTICA	RESULTADO Y/O COMPARACION CON SF ₆
Toxicidad	No tóxico. Nivel similar al SF ₆ . Los test LC50 dieron resultados satisfactorios. Los test tampoco mostraron la posibilidad de que el HFO1234zeE fuera potencialmente carcinogénico, mutagénico o toxico para la reproducción (CMR).
GWP	SF ₆ = 23.500 HFO1234zeE = 6
Rigidez dieléctrica (prueba de impulso de rayo)	98% SF ₆ en campo homogéneo 81% SF ₆ en campo heterogéneo
Compatibilidad con materiales	Alta compatibilidad: concentración de subproductos inferior al 1% del volumen del gas presente y la variación del peso del material inferior al 1%.
Estabilidad del gas bajo campo eléctrico	Sin evolución en la presión del gas después de 6 meses de prueba.
Estabilidad del gas bajo el efecto de descargas parciales	Los test a diferentes niveles de descargas parciales validaron la estabilidad del gas tanto para las propiedades del aislamiento como en la evolución de la presión del gas.
Efecto de la temperatura en el gas	No se aprecia degradación del gas en las medidas de su presión en los ensayos de incremento de temperatura.
Descargas parciales en los equipos	Los resultados de los ensayos de descargas parciales en los equipos han sido similares a los obtenidos con SF ₆ .
Efecto de la temperatura en los equipos	Los resultados de los ensayos de temperatura en los equipos han sido similares a los obtenidos con SF ₆ .
Fallo de arco interno/inflamabilidad	El comportamiento de los equipos ensayados es similar al SF ₆ .
Extinción del arco	El comportamiento del HFO1234zeE no ha sido satisfactorio, por lo que se recomienda su utilización en combinación con interruptores de vacío.

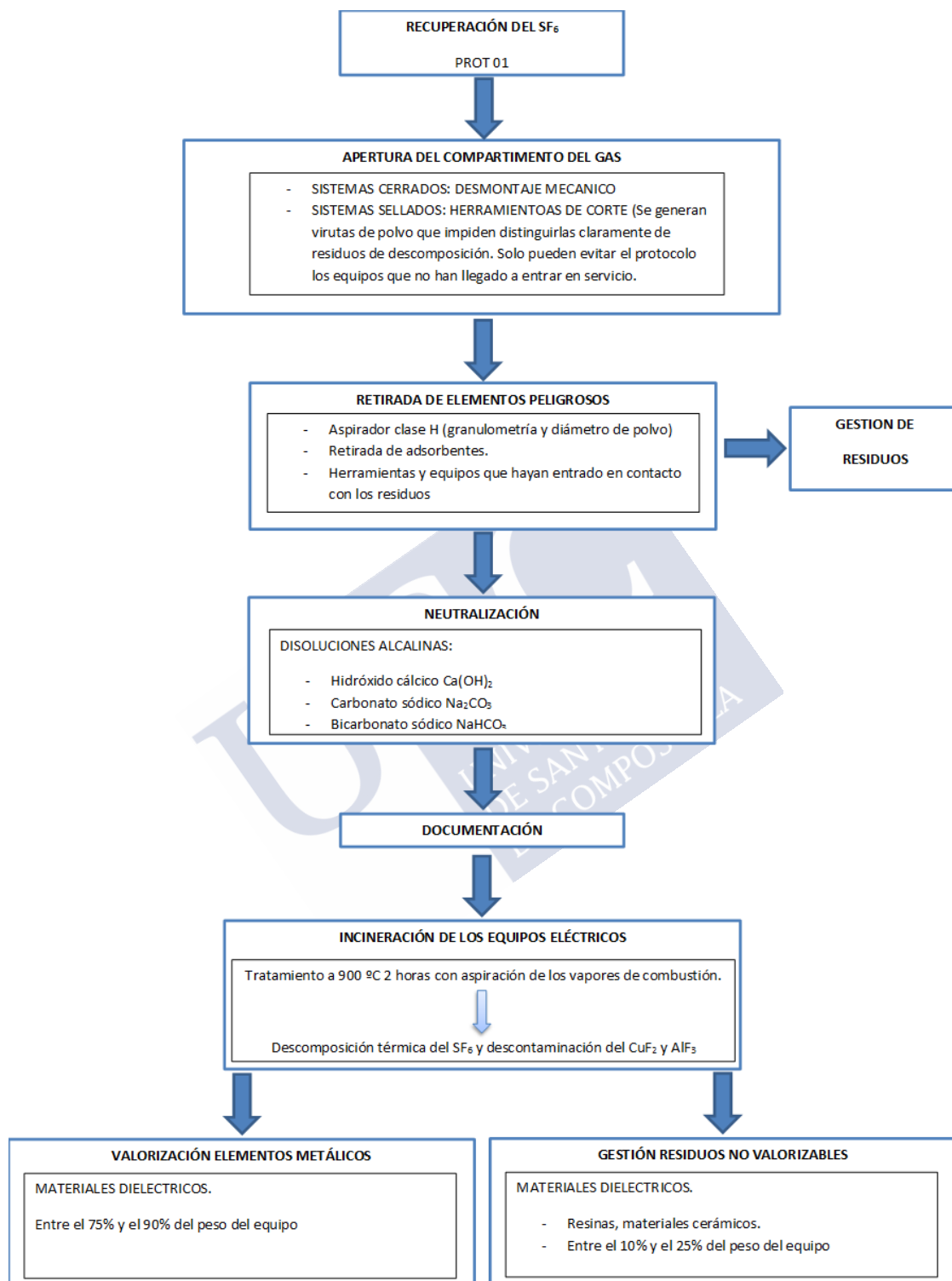


Figura 65: Protocolo de eliminación de los equipos que han contenido SF₆ al final de su vida útil
Elaboración propia a partir de [198]

Tabla 40: Alternativas SF₆
Elaboración propia a partir de [204]

TIPO	ASLAMIENTO /GWP	CORTE /GWP	PRIMERA EXPOSICION DEL PRODUCTO	PILOTOS Y AÑO DE ENTREGA/SERVICIO	HUELLA vs SF6	PESO vs SF6	COMENTARIOS
24 kV GIS with air and Fluoroketone mixture for insulation	C5- perfluoroketone gas mixed with dry air at 1.3 bar abs. / <1	Vacuum interrupter / 0	Prototype shown in Hanover fair 2015	2 S/S, in Switzerland and Germany, first one in service since beginning of 2016	Same	Similar weight	Derating of rated current vs. similar SF ₆ switchgear
12 and 24 kV Ring Main Unit with vacuum interrupters	12kV GIS for RMU (Secondary distribution)	Vacuum interrupter / 0		more than 100 RMU installed all over the world	Same footprint as 12kV SF6	Slightly higher weight than 12 kV SF ₆	Switch-fuse protections are replaced by circuit-breakers.
	24 kV GIS for RMU (Secondary distribution)	Vacuum interrupter / 0	Q2/2016	Deliveries started end 2016	Same footprint as 24kV SF ₆	Slightly higher weight than 24 kV SF ₆	Switch-fuse protections are replaced by circuit-breakers.
17.5 kV Shielded solid insulation switchgear with vacuum interrupter	Air & Shielded Solid epoxy or EPDM, disconnecting by vacuum interrupter, air earthing-switch. / 0	Vacuum interrupter / 0		No specific pilots. First commercial equipment in Sweden and Netherlands in service since end of 2012	Similar	Higher weight than a SF ₆ GIS RMU & similar weight for CB functions	Switch-fuse protections are replaced by circuit-breakers
24kV SF6 free GIS for secondary distribution		Vacuum interrupter / GWP is reduced around 90% versus SF ₆					Details of the gas mixture are not published

..

	TIPO	AISLAMIENTO /GWP	CORTE /GWP	PRIMERA EXPOSICION DEL PRODUCTO	PILOTOS Y AÑO DE ENTREGA/SERVI CIO	HUELLA vs SF6	PESO vs SF6	COMENTARIOS
Generator circuit breakers	GCB 24kV	Air / 0	Vacuum circuit-breaker (3 VI per phase) / 0	Launched in 2015	Launched in 2015	Similar		
72kV GIS« clean air » with vacuum interrupte	72kV GIS	air / 0	Vacuum interrupter / 0	Prototype shown in Hannover fair 2015	No data	Larger		Designed for offshore windfarm application (inside tower installation)
145kV GIS “clean air” with vacuum interrupter	145 kV GIS	Air / 0	Vacuum interrupter / 0	Prototype shown at Cigre Session 2016	No, at time	Larger		
145kV GIS CO ₂ & Fluoronitrile and O2 for insulation and interruption	145 kV GIS	CO ₂ and C4- Perfluoronitrile and O2 / ~450	CO ₂ and C4- Perfluoronitrile and O2 / ~450	Prototype shown at Cigre session 2016	S/S in Switzerland, France, Germany & Denmark for commissioning 2017 & 2018	Same		
170kV GIS CO ₂ , Fluoroketone & O2 for insulation & interruption	170 kV GIS	CO ₂ and C5- Perfluoroketone and O2 / <1	CO ₂ and C5- Perfluoroketone and O2 / ~450	IEEE conference 2015	S/S in operation in Zurich for EWZ (Switzerland) since 2015	Larger		
420kV GIB gas insulated bus- duct insulation made of CO ₂ & Fluoronitrile	420 kV GIB	CO ₂ and C4- Perfluoronitrile gas mixture / ~350	Not applicable	Prototype shown at Cigre session 2016	Applications: Sellindge S/S for National Grid (UK)/ energized Q1 2017	420kV GIB gas insulated bus- duct insulation made of CO2 & Fluoronitrile		CO ₂ and C4- Perfluoronitrile gas mixture / ~350

::

	TIPO	AISLAMIENTO /GWP	CORTE /GWP	PRIMERA EXPOSICION DEL PRODUCTO	PILOTOS Y AÑO DE ENTREGA/SERVICIO	HUELLA vs SF6	PESO vs SF6	COMENTARIOS
72kV LT dry air or nitrogen and vacuum CB, from two different suppliers	72 kV live tank circuit breaker	Air or N ₂ depending on suppliers/ 0	Vacuum circuit-breaker / 0	Prototype shown at Cigre session 2012	France (several sites); another European countries & New-Zealand / 2012	Same		
72/145kV LT CO ₂ & O ₂ circuit breakers	72kV/145kV AIS Live Tank circuit breaker	CO ₂ & O ₂ / 1	CO ₂ & O ₂ circuit-breaker / 1	72.5 kV CB was first exhibited in 2012	Pilot (capacitor bank switching) of 145 kV CB	72/145kV LT CO ₂ & O ₂ circuit breakers		CO ₂ & O ₂ / 1
245kV Current Transformers. CO ₂ & Fluoronitrile insulated	245 kV AIS Current Transformer	CO ₂ and C4-Perfluoronitrile gas mixture / ~350	Not applicable	Prototype shown at Hanover Fair 2015 & Cigre session 2016	First units for Germany energized 2017	Same		
72.5kV & 145kV dry air Instrument Transformers	72.5 kV dry air combined Instrument Transformer for AIS 145 kV dry air combined Instrument Transformer for AIS	Dry air / 0	Not applicable	Prototypes shown at Cigre session 2016	NA	Same than 123kV SF ₆ design		
		Dry air / 0	Not applicable	Prototypes shown at Hanover fair 2017	NA	Larger		
145kV Live tank - prototype	145 kV AIS Live tank circuit breaker	CO ₂ and C4-Perfluoronitrile gas mixture / ~350	Circuit-breaker in CO ₂ and			145kV Live tank - prototype		CO ₂ and C4-Perfluoronitrile gas mixture / ~350

...

	TIPO	AISLAMIENTO /GWP	CORTE /GWP	PRIMERA EXPOSICION DEL PRODUCTO	PILOTOS Y AÑO DE ENTREGA/SERVICIO	HUELLA vs SF6	PESO vs SF6	COMENTARIOS
145kV LT with dry air and vacuum CB	145 kV live tank circuit breaker	Air / 0	Vacuum circuit-breaker / 0	Prototype shown at Hannover fair 2017	1 pilot 110kV planned in 2018 (Germany)	Unknown		
DT 72kV 31.5kA from Japan	72.5kV AIS Dead tank circuit breaker	Dry air 0.15MPa/ 0	Vacuum interrupter / 0	Type tests completed and presented during Cigre 2012	A few pilots in operation in Japan and USA	Similar overall footprint		72.5kV AIS Dead tank circuit breaker
DT 72kV from Japan	72.5kV AIS Dead tank circuit breaker	N2 at atmospheric pressure and solid insulation / 0	Vacuum interrupter / 0	Prototype presented during IEEE 2015	Unknown	Unknown		
GIS 145kV from South Korea	145kV GIS	Unknown	Vacuum interrupter / 0	Cigre session 2016 (publication)	Unknown	Unknown		

3.4.6. La protección de la avifauna en las redes de distribución de electricidad

La protección de la avifauna consiste en un conjunto de medidas para evitar o mitigar los efectos negativos de la interacción de las aves con las redes eléctricas, tanto en el sentido de la disminución de la mortalidad de las aves como de las afecciones al suministro derivados de los incidentes causados por ellas.

La mortalidad de las aves tiene lugar tanto por electrocución como por colisión. La electrocución del ave tiene lugar por el contacto simultáneo entre el conductor y los apoyos, armados o herrajes o por el contacto entre dos conductores, por lo que las aves de mayores dimensiones están más expuestas a este peligro, así como también las aves que utilizan los apoyos para posarse o como soporte para la nidificación. En el caso de la colisión esta tiene lugar generalmente con conductores que el ave no pudo detectar. En el caso de la colisión, hay menos incidencia en las líneas de transporte debido al grosor de los cables, aunque se dan casos con el cable de tierra cuya sección es menor. Tiene una mayor incidencia entre aves que se desplazan en bandadas [205].

Otro aspecto relacionado con la avifauna es la nidificación sobre elementos de las infraestructuras, particularmente sobre apoyos (Figura 66). Además del riesgo de electrocución para las aves, la nidificación supone un problema significativo para las redes de distribución ya que la acumulación de materiales transportados por las aves y la acumulación de excrementos generan averías que afectan a la continuidad del suministro. También se pueden llegar a generar problemas de estabilidad de los apoyos ya que aves como las cigüeñas, que frecuentemente usan los apoyos como soporte para la nidificación, construyen nidos particularmente grandes y pesados. En el caso de las líneas de baja tensión, puede ocurrir la rotura de neutro que genera importantes sobretensiones en su red. La retirada o destrucción de nidos está prohibida por la Ley 33/2015 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad, pero establece excepciones que permiten dicha retirada con autorización administrativa previa justificación de encontrarse entre dichas excepciones. Aunque es necesario evaluar cada caso, la excepción más aplicable en estos casos es la identificada con letra “a)” del artículo 61 de dicha Ley relativa a efectos perjudiciales para la salud y la seguridad de las personas, por los problemas estructurales producidos en los apoyos, o las sobretensiones causadas por la rotura del neutro que pueden producir accidentes. También podría considerarse el apartado “g)” relativa a la protección de la flora y la fauna silvestres y los hábitats naturales, debido a que la presencia de las aves en las estructuras puede provocar su electrocución y debido a este incidente podría provocarse un incendio forestal. Las autorizaciones para la retirada de los nidos vienen condicionadas a hacerlo una vez finalizado el período de cría (una vez comenzado agosto).

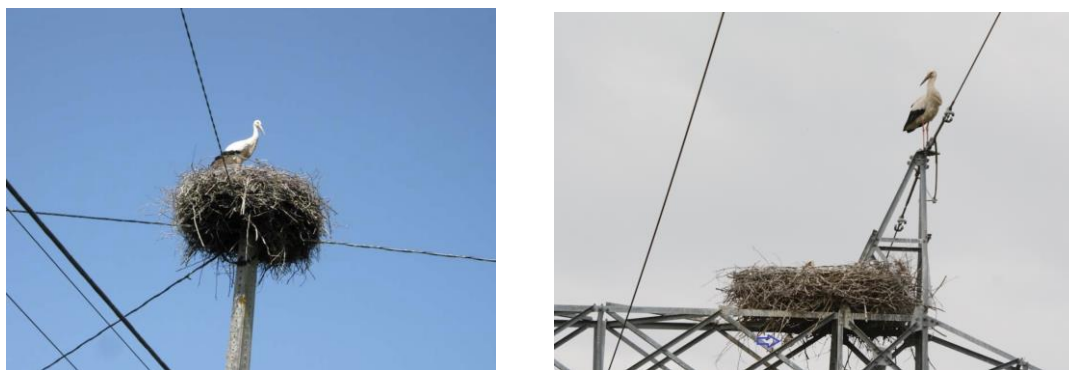


Figura 66: Nidificación sobre apoyos de baja y alta tensión (autor)

3.4.6.1. Desarrollo normativo

La necesidad normativa para el establecimiento de medidas de protección de la avifauna en las redes de distribución parte del RD 1432/2008 que establece las medidas que es necesario adoptar en las instalaciones de nueva construcción o existentes ubicadas en zonas de protección. Estas medidas son tanto de protección contra la electrocución como contra la colisión de las aves. Sin embargo, en el caso de las instalaciones existentes únicamente obliga a la instalación de las medidas contra la electrocución, dejando las medidas anticolidión con carácter voluntario.

Esta misma norma define cuáles son las zonas de protección, empezando por las zonas ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves), así como otras zonas asociadas a planes de conservación y recuperación de aves y otras áreas donde se desarrolle el ciclo vital de especies incluidas en catálogos de especies amenazadas tanto nacionales como autonómicos. Dado que en la definición de las zonas protegidas existen delimitaciones de carácter autonómico, la norma indica que las comunidades autónomas deben publicar las zonas de protección dentro de su ámbito territorial. En este sentido, las zonas de protección en Galicia en las que se aplican las medidas de protección de la avifauna quedan delimitadas por la Resolución del 18 de septiembre de 2018 de la Consellería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Figura 67).

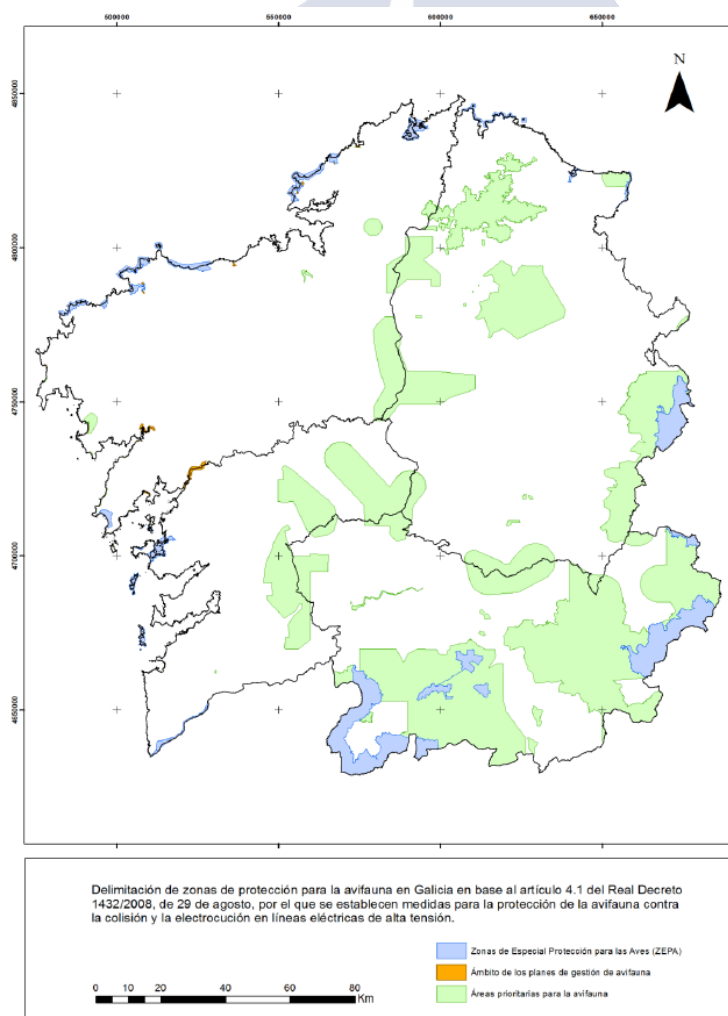


Figura 67: Zonas de protección de avifauna en las que es de aplicación las medidas de protección en líneas eléctricas de alta tensión [206]

3.4.6.2. Medidas de protección de la avifauna

El RD 1432/2008 establece una serie de condiciones de diseño para las nuevas instalaciones ubicadas en zonas de protección, relativas a distancias y disposiciones de elementos que no tienen gran problema para su aplicación. En el caso de las instalaciones existentes en la mayoría de los casos se puede realizar adaptaciones dotando de protecciones contra la electrocución en elementos de las instalaciones cuando no se cumplan las distancias entre elementos indicados en dicho Real Decreto (Tabla 41 y Figura 68).

Tabla 41: Medidas de adaptación a la normativa de avifauna en instalaciones existentes (elaboración propia)

Apoyos de alineación	Forro para grapas de suspensión
	Cubierta para forrado de conductores
Apoyos de amarre/ángulo/fin de línea	Forro para grapas de amarre
	Cubierta para forrado de conductores y puentes
Apoyo con centro de transformación o interruptor aéreo	Forro para grapas de amarre
	Cubierta para forrado de conductores y puentes
	Forro para protección de autoválvulas y bornes
Apoyo con paso aéreo-subterráneo	Forro para grapas de amarre
	Cubierta para forrado de conductores y puentes
	Forro para protección de autoválvulas
Apoyo con seccionadores	Forro para grapas de amarre
	Cubierta para forrado de conductores y puentes
	Protector aislante para seccionadores

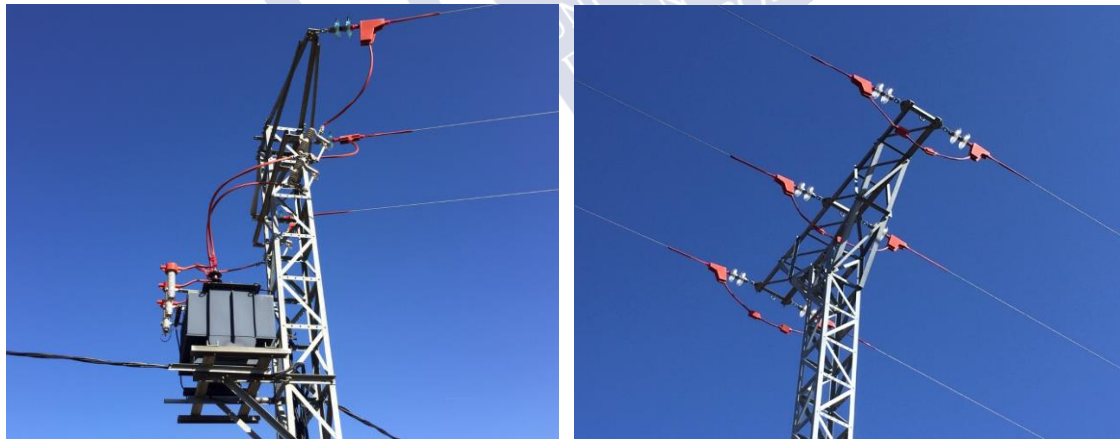


Figura 68: Medidas de adaptación a la normativa de avifauna en instalaciones existentes (autor)

En lo que respecta a las medidas anticolidión estas consisten en la instalación de balizas elastoméricas con tiras de neopreno y bandas centrales fotoluminiscentes y reflectantes. Otra opción muy común es la instalación de espirales que se instalan de forma que exista un elemento anticolidión cada 10 m de línea (cada 10 m si hay un único cable de tierra o cada 20 m en cada conductor de fase de forma alterna si no hay cable de tierra).

3.5. DISCUSIÓN

La red eléctrica es la infraestructura energética más extensa, de manera que se despliega de forma capilar por el territorio siendo el servicio energético más universal que existe y como tal, considerado como un servicio esencial por la Ley 24/2013 del Sector Eléctrico. Después de décadas de inversiones, estructuralmente es una infraestructura robusta y fiable que contribuye de forma esencial a la seguridad energética del país y con decisiones adecuadas de diseño y mantenimiento no tiene por qué afectar negativamente a la seguridad natural. En este último aspecto, sin embargo, es necesario tener en cuenta que existe en parte de la sociedad preocupación por la posible afección de campos electromagnéticos sobre la salud humana. En este sentido la Organización Mundial de la Salud, a la vista de las publicaciones científicas existentes hasta la fecha, concluyó que los resultados obtenidos no confirman que la exposición a campos electromagnéticos de baja intensidad produzca consecuencias para la salud, aunque reconoce que hay ciertas lagunas sobre los efectos biológicos que es necesario investigar [207].

En lo que se refiere al uso del hexafluoruro de azufre en la red de distribución, no parece que a medio plazo se vaya a disponer de forma masiva de dispositivos con sustancias alternativas. En este horizonte temporal el parque de equipos con SF₆, no solo se mantendrá, sino que aumentará significativamente debido a una rápida adaptación de instalaciones existentes de cara a su automatización. Aunque en la gran mayoría de dispositivos permanece confinado durante toda la vida útil y el escaso peso que este gas tiene cuantitativamente en las emisiones de gases de efecto invernadero, el elevado GWP del SF₆ nos tiene que hacer ver la utilización del gas desde el punto de vista del ciclo de vida de los dispositivos, desde la producción del gas, su transporte, el proceso de fabricación de los dispositivos, el transporte de estos dispositivos, su uso, su mantenimiento, su retirada y la gestión de los residuos.

Un aspecto muy importante, sobre todo debido a los efectos del cambio climático que prolonga las épocas anuales cálidas, es la prevención de incendios forestales causados por incidentes en la red eléctrica. El adecuado mantenimiento de la red, tanto en lo que respecta a la gestión de la biomasa en el entorno de las redes como a la comprobación periódica del estado de las instalaciones, es un elemento fundamental para la prevención de los incendios forestales, que como hemos visto, dadas unas determinadas condiciones pueden resultar catastróficos no solo para la seguridad natural, sino que también suponen una seria amenaza para las vidas humanas y los bienes materiales.

De cara a los próximos años la red de distribución tiene que enfrentarse a cuatro retos fundamentales que a la vez están interrelacionados:

- Adaptar la red a un crecimiento muy importante de la electrificación de la sociedad a todos los niveles para el cumplimiento de los objetivos climáticos, con lo que el sector contribuirá de forma decisiva a la seguridad natural y reforzará a su vez la seguridad energética. Esto conllevará la ejecución de inversiones muy importantes, pero el sector está habituado a la ejecución de elevados niveles de inversión y si existe un marco regulatorio estable, tanto en política energética como a nivel retributivo, esto no debería ser un problema.
- En línea con el apartado anterior, la red también se tiene que adaptar para integrar a un despliegue mucho más amplio que el actual de recursos distribuidos como sistemas solares fotovoltaicos, dispositivos eólicos, almacenamiento de energía, microrredes, vehículos eléctricos, sistemas de gestión de la demanda o de eficiencia energética. Para ello es necesario crear un sistema eléctrico flexible, donde la propia red, los recursos distribuidos, la producción convencional y la información disponible puedan ser gestionados adecuadamente a nivel operacional por los centros de control, a nivel de gestión por las empresas

operadoras y a nivel de política energética por los diferentes ámbitos de gobernanza.

- Incremento de la digitalización, así como una mayor sensorización de la red que permita la adquisición y tratamiento de la información necesarios para la toma de decisiones que se indicaba en el apartado anterior. Este proceso debe realizarse estableciendo las medidas necesarias de ciberseguridad.
- Incrementar el nivel de automatización de la red, que en la actualidad está disponible en determinados puntos, hasta hacerlo extensible a todos los puntos automatizables. Con ello se mejorará la calidad de suministro, sobre todo en lo que respecta a su continuidad, y, por lo tanto, la seguridad energética se verá reforzada. Esta automatización también permite respuestas rápidas a incidentes de forma que se pueden evitar consecuencias negativas para la seguridad natural como por ejemplo en el caso de los incendios forestales.

3.6. CONCLUSIONES

La necesidad de reducción de emisiones de dióxido de carbono para el cumplimiento de los objetivos climáticos pone el foco en la electricidad como elemento esencial en la consecución de estos objetivos. Por un lado, la necesidad de incrementar la producción renovable que, en buena medida será descentralizada formando parte de un sistema de recursos energéticos distribuidos y por otro lado la electrificación de parte de consumos energéticos que en la actualidad utilizan otras formas de energía (movilidad, calefacción, etc.) hacen que las redes eléctricas cobren un importante protagonismo en la deseada transición energética. Una importante ventaja de estas infraestructuras es su elevada fiabilidad por lo que, con las inversiones necesarias y un marco regulatorio estable podrán adaptarse sin problema a las nuevas necesidades energéticas. Son además en general, infraestructuras seguras, pero esto es así con un adecuado diseño y mantenimiento. A nivel de seguridad natural es fundamental la gestión de la vegetación en entorno de las instalaciones para evitar catástrofes como las ocurridas recientemente en Estados Unidos.

4. RECURSOS ENERGÉTICOS Y MINERALES MARINOS

4.1. INTRODUCCIÓN

La minería marina consiste en las actividades necesarias para la obtención de los recursos minerales y energéticos de la corteza oceánica, tanto de la plataforma continental como del lecho marino de las aguas internacionales. Estas actividades comprenden la exploración o prospección, la extracción y transporte de los recursos hasta los lugares de utilización o procesado.

Desde hace décadas la extracción de petróleo y gas de los fondos marinos se ha convertido en una aportación muy importante dentro de la producción global de estos recursos, alcanzando en la actualidad el 25% de dicha producción, manteniéndose estable en el caso del petróleo desde el año 2000, pero aumentando en un 50% en el caso del gas desde ese año [208]. Esta actividad se describirá ampliamente en el texto. En el caso de los recursos minerales y en algunos energéticos, aunque su existencia es conocida desde hace tiempo, su explotación se veía dificultada por limitaciones tecnológicas y por falta de viabilidad económica. En la actualidad se están realizando prospecciones en varios lugares del planeta para la localización y caracterización de los recursos. Todas estas actividades tienen asociados procesos mecánicos y químicos que impactarán sobre el medio ambiente marino. Por otro lado, aun no siendo una actividad de minería marina, la instalación de parques eólicos marinos también tiene, al menos durante la fase de construcción, impactos análogos a algunos de los procesos mineros.

La actividad económica con carácter sostenible es uno de los objetivos de las Naciones Unidas. En este sentido, el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas denominado *Green Energy in a Blue World* identifica las posibilidades del medio marino en los ámbitos, entre otros, energético y de extracción de minerales. En el caso europeo la Comisión Europea emitió dos Comunicaciones de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, una en 2012 (COM(2012) 494) “Crecimiento azul. Oportunidades para un crecimiento marino y marítimo sostenible” [209] y posteriormente la Comunicación COM(2014) 8 “La energía azul. Medidas para aprovechar el potencial de la energía oceánica de los mares y océanos europeos hasta 2020 y en adelante” [210]. En lo que respecta a los recursos energéticos, el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) en su informe sobre energías renovables identifica varias fuentes de energía primaria en el ámbito marino, unas con un desarrollo tecnológico y comercial mayor que otras, pero que la velocidad de avance tecnológico hace pensar en un aprovechamiento de estas energías. La energía undimotriz (a través de las olas), la energía mareomotriz (mediante las mareas), la energía de las corrientes marinas, la energía maremotérmica (*Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC*) y la energía de los gradientes de salinidad son las identificadas por el IPCC como fuentes renovables de energía primaria con potencial de utilización [211]. También, en el caso de la Unión Europea las Comunicaciones anteriormente citadas se centran en estos tipos de energías a excepción de los gradientes de salinidad que no se contemplan y en el caso de la conversión de energía térmica oceánica esta se contempla como opción para los territorios de ultramar (en el Caribe y en el Océano Índico). Todas estas tecnologías deben enfrentarse a importantes retos empezando por los costes de desarrollo de estas

tecnologías, pero también los hay de tipo regulatorio y ambientales. En España la instalación de este tipo más destacada la planta undimotriz de Mutriko con 296 kW de potencia instalada [212]. En cualquier caso, la producción eléctrica renovable de origen marino está en el entorno del 0,02% de la producción renovable mundial a pesar de que su producción se ha duplicado desde 2012 a 2016 después de haberse estancado en el período 1990-2012.

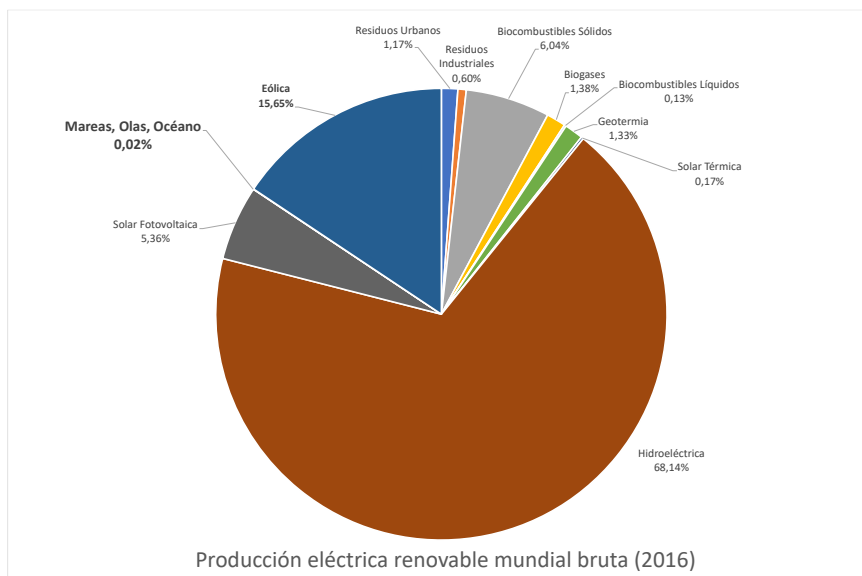
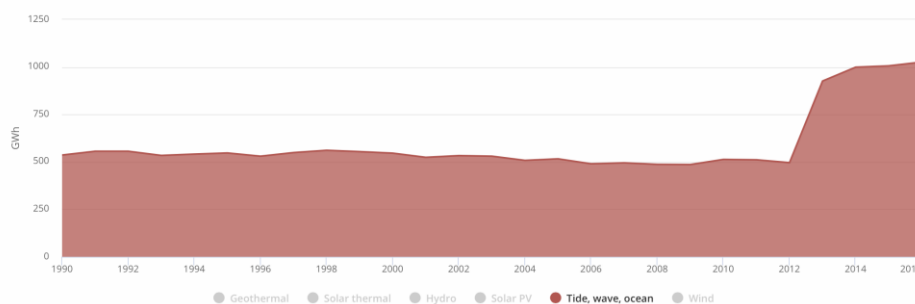


Figura 69: Producción eléctrica renovable mundial bruta (2016)
Elaboración propia a partir de [213]

Electricity generation from renewables by source
World 1990 - 2016



Electricity generation from renewables by source
World 1990 - 2016

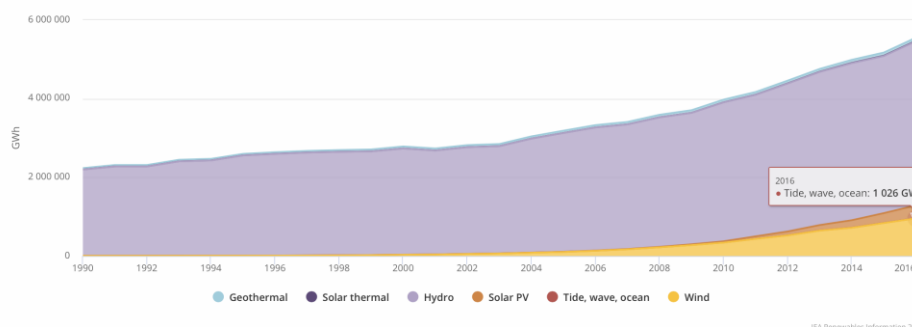


Figura 70: Evolución de la producción eléctrica renovable mundial bruta y detalle producción marina, excluyendo eólica offshore (2016) [213]

En muy importante destacar que estos datos no incluyen la producción eólica offshore, que se encuentra actualmente en plena expansión, aunque en España prácticamente no hay en este momento aprovechamientos de este tipo a excepción de una instalación experimental en Canarias [214]. En cambio, en el Mar de Norte las instalaciones eólicas *offshore* tienen una gran implantación, destacando Reino Unido y Alemania. Este aspecto se desarrollará en un apartado posterior.

Además de la energía eólica *offshore* se están desarrollando proyectos de tecnología fotovoltaica. Estos parques fotovoltaicos flotantes se instalaban hasta la fecha en lagos artificiales (por ejemplo en Huainan, China [215]), embalses (por ejemplo en Londres, UK [216]), plantas de tratamiento de aguas (Lismore, Australia [217]). Sin embargo, la necesidad de espacio en determinados países hace que se considere la posibilidad de utilizar el mar como emplazamiento para este tipo de instalaciones, como está proyectado en Holanda [218].

4.2. INCREMENTO DE LA DEMANDA DE RECURSOS

En las últimas décadas el incremento en la demanda de recursos, tanto minerales como energéticos, ha sido muy intensa. Lejos de estabilizarse, este aumento en la demanda de recursos se prevé que siga creciendo a medida que se desarrollan nuevos sectores tecnológicos y zonas muy densamente pobladas del planeta acceden a bienes y servicios cuya producción requiere de estos recursos. Por otro lado, aspectos relacionados con los sectores estratégicos para la seguridad nacional han supuesto un aumento en la demanda de determinadas materias primas y de fuentes de energía primaria. Teniendo en cuenta que la corteza oceánica es superior en tamaño a la continental y que además son zonas menos explotadas en algunos aspectos que en la tierra firme y con recursos naturales propios, tanto de carácter convencional como el petróleo y el gas como nuevas fuentes de recursos minerales y energéticos, se entiende el interés de la industria en su explotación. Estas perturbaciones antropogénicas del fondo marino producen impactos tanto sobre el medio ambiente (afecciones a los ecosistemas marinos) como sobre otras actividades humanas ya establecidas (pesca, tráfico marítimo, infraestructuras). A esto hay que añadir el elevado grado de desconocimiento del fondo marino a excepción de las plataformas continentales lo que hace necesario estudiar y evaluar el impacto de las diferentes actividades de minería marina sobre el medio, empezando por la prospección y continuando con el establecimiento de instalaciones o el despliegue de flotas, la extracción de los recursos y el transporte. Por otro lado, el desarrollo de estas actividades más allá del suelo marino correspondiente a las aguas territoriales de los diferentes países puede generar situaciones de conflicto. En este sentido, aunque la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA) regula la minería marina más allá de la plataforma continental, en ocasiones este tipo de organismos puede no ser suficientemente eficaz en función del contexto geopolítico internacional.

4.2.1. Sectores estratégicos para la seguridad nacional

En lo que respecta a la seguridad nacional, el gobierno, desarrolla periódicamente la Estrategia de Seguridad Nacional cuya última edición corresponde a 2017 [219]. En ese documento se fijan sectores estratégicos e infraestructuras críticas cuya actividad debe ser garantizada y por lo tanto el suministro de materias primas y recursos energéticos debe estar asegurado. Esto unido a la necesidad de dar cumplimiento a los compromisos del Estado con diversos organismos internacionales en materia de cambio climático y ambientales hace que se establezcan objetivos, entre otros, en materia de seguridad

energética y preservación del medio ambiente en el sentido de la diversificación de fuentes de energía y la conservación del medio ambiente y la biodiversidad dentro de un marco de sostenibilidad y de lucha contra el cambio climático, identificado, junto con la vulnerabilidad energética como desafíos a los que se enfrenta la seguridad nacional. En lo que respecta a las actividades de aprovechamiento de recursos energéticos y minerales marinos, entre los aspectos relacionados con la seguridad de la actividad podrían señalarse los siguientes [220]:

- Ataques de piratería, ataques terroristas u otros actos ilícitos de violencia, por ejemplo, a buques petroleros o a plataformas petrolíferas. En este sentido existen los Convenios SUA para la represión de actos ilícitos contra la seguridad de la navegación marítima y el Convenio para la represión de actos ilícitos contra la seguridad de plataformas fijas emplazadas en la plataforma continental (ambos de 1988 modificados en 2005) [221].
- Acciones de guerra. Frecuentemente en los conflictos bélicos las instalaciones energéticas son objetivos principales.

Ya sea derivados de las acciones que se acaban de describir o de las propias actividades de prospección, extracción y transporte de los recursos energéticos y minerales, otro aspecto relacionado con la seguridad de este sector estratégico es la seguridad ambiental que se ve comprometida por la introducción en medio ambiente, tanto marino, como atmosférico y terrestre (como sucede con los vertidos de petróleo) de sustancias o formas de energía.

4.2.2. Incremento de la actividad económica

El segundo aspecto identificado como causante de un aumento en la demanda de materias primas y recursos energéticos es el incremento en la actividad económica sobre todo en las zonas en desarrollo. Esta vendría dada fundamentalmente por dos factores: el crecimiento económico y el desarrollo de políticas de industrialización. En el primer caso con más posibilidades de éxito que en el segundo al ser una fuente natural de industrialización. Pero ¿tendrá lugar el crecimiento económico en las próximas décadas?

Según las previsiones de la OCDE para 2060 [222], el crecimiento del PIB mundial desciende del 3,5% actual al 2% en 2060 debido a la desaceleración de los grandes países emergentes. Aun así, el crecimiento es moderado y además según estas mismas previsiones se producirá un incremento del nivel de vida sobre todo en China, India y en países del este de Europa. En cambio, en los países de la OCDE se prevé una caída del crecimiento debido al envejecimiento de la población. Esto significará un desplazamiento del peso económico mundial hacia Asia.

Aunque quizás menos efectivas que el crecimiento económico, la existencia y desarrollo de políticas de industrialización, o reindustrialización en el caso de los países desarrollados, es un aspecto muy importante. Y la realidad es que están teniendo lugar en todo el mundo. Veamos dos ejemplos de zonas del planeta económicamente opuestas.

En los países desarrollados estas políticas van desde iniciativas proteccionistas muy poco sutiles por parte de Estados Unidos con el fin de desarrollar la industria propia, aun a costa de las respuestas que puedan adoptar socios y competidores, hasta el establecimiento de marcos que favorezcan la reindustrialización. En este sentido la Comisión Europea, en su Comunicación COM(2014)14 [223] “Por un Renacimiento Industrial Europeo”, reconoce que la última crisis económica hizo ver la importancia del sector industrial como uno de los principales cimientos de una economía robusta, al

ejercer un fuerte efecto tractor sobre otros sectores de la economía y al ser una fuente de empleo con mayor nivel de estabilidad.

En el otro lado del nivel de industrialización está África. Sin embargo, en este continente se aspira también a un mayor nivel de industrialización. A nivel internacional la Asamblea General de las Naciones Unidas, mediante la Resolución 70/293 [224], en 2016 declaró el Tercer Decenio del Desarrollo Industrial para África, encargando a la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) el desarrollo de las actividades en este sentido. Además, la Agenda 2063 de la Unión Africana establece como objetivo, entre otros, la industrialización de las economías africanas a través de sus recursos naturales [225]. A esto hay que añadir la intervención de China, que se ha convertido en el mayor socio comercial del continente según la Iniciativa de Investigación China-África de la Universidad Johns Hopkins. Según sus datos entre el año 2000 y 2017 el gobierno, bancos y empresas chinos han proporcionado créditos a gobiernos africanos y empresas públicas por valor de 143.000 millones de dólares en forma de ayudas al desarrollo, créditos de exportación, etc., aunque todavía no ha alcanzado a Estados Unidos como donante principal [53].

En definitiva, de lo visto hasta ahora, tanto a partir del crecimiento económico como del establecimiento de políticas de industrialización se generará un incremento en la industrialización del planeta que llevará asociado un incremento en la demanda de materias primas y de recursos energéticos.

4.2.3. Nuevas tecnologías

Otro de los aspectos que aumentará la demanda de materias primas y de recursos energéticos es el surgimiento de nuevas tecnologías, ya sea de nuevo desarrollo o en sectores más tradicionales en los que surgen nuevas actividades o las que ya existen se le aplican nuevos procesos. En este sentido existe un consenso en el siglo XXI estamos inmersos en la cuarta revolución industrial caracterizada por la digitalización de los procesos, después de la tercera revolución ocurrida en el siglo XX y relacionada con la automatización de los procesos, la segunda a finales del siglo XIX y comienzos del XX con la electrificación y la primera a finales del siglo XVIII con la máquina de vapor.

La implantación de estas nuevas tecnologías, que pueden ser más o menos disruptivas, generalmente responde a determinados patrones que varias metodologías tratan de predecir. Una de las más aceptadas en los últimos años [226] es el modelo *hype cycle* desarrollado por Gartner, que anualmente publica, entre otros temas, para las tecnologías emergentes. Este modelo se representa mediante una curva que refleja cinco estados diferentes en la implantación de una nueva tecnología: lanzamiento de una tecnología, expectativas sobredimensionadas, desilusión, consolidación y productividad. A cada uno de estos estados les corresponderían diferentes hitos.

La curva de Gartner publicada anualmente combina la identificación de diferentes innovaciones tecnológicas con su estado actual dentro de los cinco definidos y predice un intervalo de tiempo en el que esta tecnología alcanzaría la fase productiva.

Otros modelos de implantación tecnológica se habían desarrollado previamente, siendo uno de los más conocidos la “curva s” propuesta por Richard Foster [227] en la que se identifican cuatro fases: surgimiento, crecimiento, madurez y saturación o declive.

Estas nuevas actividades tendrán lugar en el sector de producción energética, en el que la necesaria transición energética significará fundamentalmente una mayor electrificación de la sociedad en lo que respecta a la movilidad eléctrica, en procesos industriales y en climatización, en paralelo con un incremento en el porcentaje de producción a partir de fuentes renovables en detrimento de fuentes de energía primaria no compatibles con los objetivos de cambio climático.

Otros sectores tradicionales en los que surgen nuevas actividades serían las infraestructuras, como redes de transporte y distribución de energía y agua, saneamiento, carreteras y autopistas y otras infraestructuras que sufrirán una sensorización y automatización a gran escala de sus instalaciones.

La aeronáutica, además del desarrollo de sus actividades tradicionales, está incorporando a múltiples sectores drones, y el continuo desarrollo de las telecomunicaciones, la robótica y la prometedora nanotecnología requieren el aseguramiento de las materias primas necesarias.

Un aspecto que tienen en común todas estas nuevas tecnologías es el uso de metales conocidos como Tierras Raras. Se corresponden con los 15 elementos conocidos como lantánidos (lantano (La^{57}), cerio (Ce^{58}), praseodimio (Pr^{59}), neodimio (Nd^{60}), prometio (Pm^{61}), samario (Sm^{62}), europio (Eu^{63}), gadolinio (Gd^{64}), terbio (Tb^{65}), disprosio (Dy^{66}), holmio (Ho^{67}), erbio (Er^{68}), tulio (Tm^{69}), iterbio (Yb^{70}) y lutecio (Lu^{71})) a los que se añaden el escandio (Sc^{21}) y el Itrio (Y^{39}). Estos están divididos a su vez en Tierras Raras Ligeras (escandio y lantánidos con número atómico 57 a 62) y Tierras Raras Pesadas (itrio y lantánidos con número atómico 63 a 71) aunque esta clasificación puede variar según las fuentes, por ejemplo, el Servicio Geológico de los Estados Unidos considera Tierras Raras Ligeras los lantánidos con número atómico del 57 al 64 sin contar con el escandio y las Tierras Raras Ligeras el itrio y los lantánidos con número atómico del 65 al 71. El nombre de Tierras Raras no significa que sean escasos, de hecho, el cerio es más común en la corteza terrestre que el cobre o el plomo, pero no son comunes los depósitos concentrados de estos metales [228]. El uso de estos metales, en general en forma de óxidos tiene lugar, por ejemplo, en baterías, imanes permanentes que se encuentran en motores y generadores eléctricos, así como en altavoces. También se utilizan en la fabricación de iluminación energéticamente eficiente. Su uso se encuentra también en sectores más tradicionales como en la fabricación de catalizadores, en el procesamiento de cristales y lentes y en la metalurgia [229].

Por último, en lo que respecta a la biotecnología, tanto en el ámbito de la salud, fundamentalmente en el ámbito farmacológico, como en la agricultura, el medio ambiente y la industria, cabe resaltar el hecho de que para su desarrollo necesita elementos de la biota que es necesario preservar, entre otras situaciones, de las actividades extractivas de los recursos minerales necesarios para el resto de los sectores.

4.2.4. Demanda de recursos energéticos

¿En qué medida tendrá lugar el incremento de la demanda de recursos energéticos? Las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), en su informe de 2017, establecen que para 2040 [230] la demanda global de energía crecerá un 30% y que de ese crecimiento el 40% será cubierto por tecnología limpias y compatibles con los objetivos de cambio climático y, por ejemplo, en la Unión Europea representarán el 80% de la nueva producción, siendo la generación eólica la principal fuente de generación eléctrica a partir de 2030. Otro aspecto en el lado positivo son las grandes mejoras en eficiencia energética ya que sin ellas el crecimiento de la demanda sería más del doble. También se prevé que la flota mundial de coches se duplique, aunque el combustible por pasajero se estabiliza por mejoras en la eficiencia de motores y combustibles y por la introducción de los vehículos eléctricos. Sin embargo, la demanda de petróleo seguirá creciendo debido fundamentalmente a los derivados y los grandes medios de transporte (aviación y barcos). En línea con lo dicho anteriormente acerca del desplazamiento económico hacia Asia, será esa zona en la que con mayor diferencia tenga lugar el incremento en la demanda de energía, suponiendo India un tercio del total del crecimiento global de la demanda pasando en 2040 a representar el 11% de la demanda global. Como

aspecto positivo, China adoptará estrategias hacia energías más limpias. En el caso de China e India la producción solar será la principal fuente renovable en 2040. En el informe de 2018 de la IEA, confirma este desplazamiento del incremento de la demanda de energía hacia los países en desarrollo, incrementando la brecha con las economías avanzadas al ver estas reducida su demanda en 44Mtep frente al informe de 2017 y los primeros aumentan su demanda en 207 Mtep respecto a dicho informe. A grandes rasgos el informe también confirma los datos del anterior en lo que respecta a las fuentes que formarán parte del incremento de la demanda, de forma que en los países en desarrollo el 38,70% de ese incremento podrá ser cubierto con fuentes compatibles con los objetivos climáticos, en particular, el 29,53% de fuentes renovables y el resto (9,18%) con energía nuclear, pero aún así casi el 20% del incremento de la demanda energética será cubierta con el petróleo, el 11% con carbón y el 30% con gas.

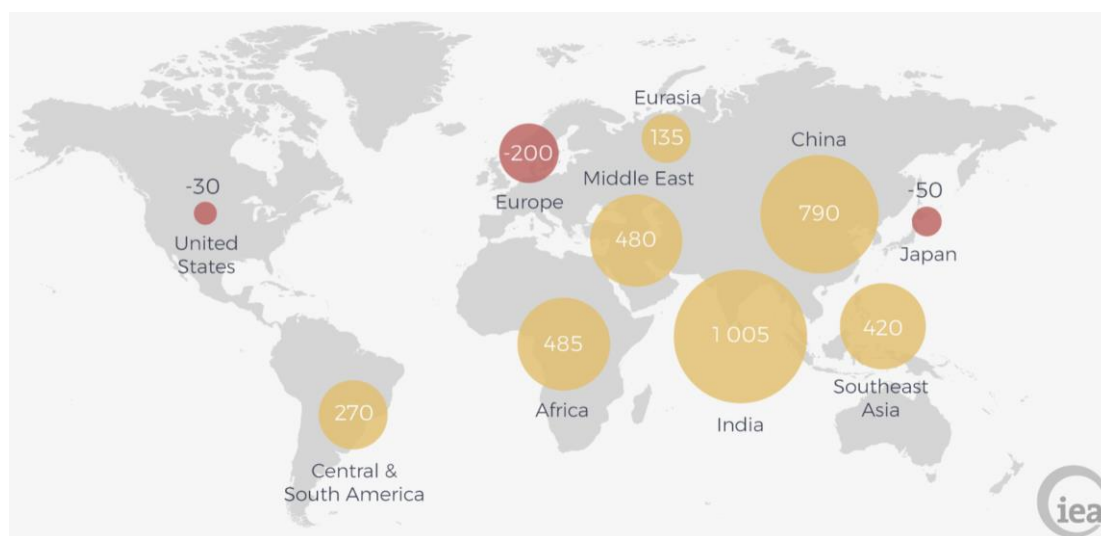


Figura 71: Aumento en la demanda de energía primaria 2040 [231]

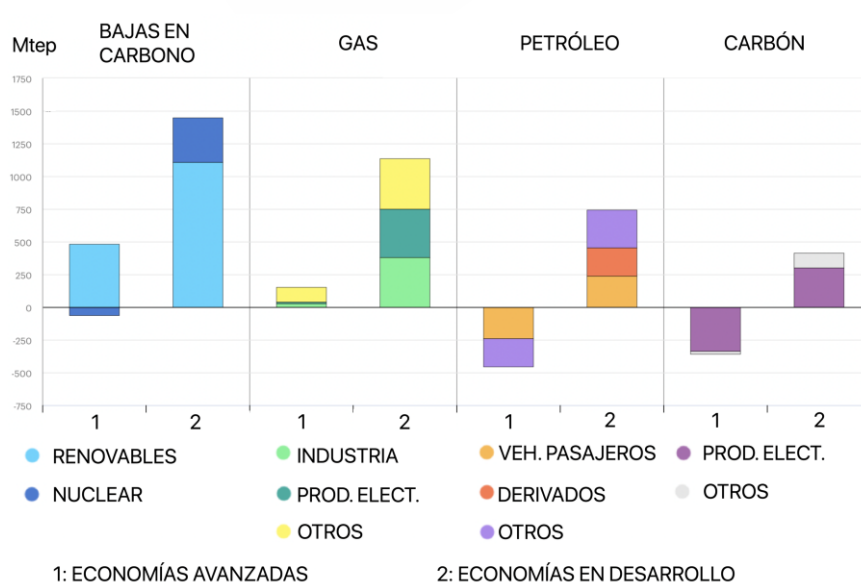


Figura 72: Aumento en la demanda de energía primaria (2017-2040) - cambios por origen y utilización de la energía
Adaptado por el autor de [232]

En este escenario, la electricidad se convierte en la protagonista del crecimiento de la demanda de energía (Figura 73), suponiendo el 40% de ese incremento, por lo que, para mantener la sostenibilidad del sistema, será necesario afrontar la descarbonización de la generación eléctrica. Esto se verá favorecido por la bajada de costes en este tipo de producción, pero deberá ser apoyada por decisiones políticas en varios ámbitos: incentivos a los consumidores para la progresiva sustitución de vehículos, sistemas de climatización, procesos industriales hacia el uso eléctrico, realizar las inversiones necesarias para dotar a las redes de distribución de la capacidad necesaria manteniendo o aumentando donde sea necesario la fiabilidad de la distribución eléctrica y en general desarrollando normativa y legislación que favorezca el proceso.

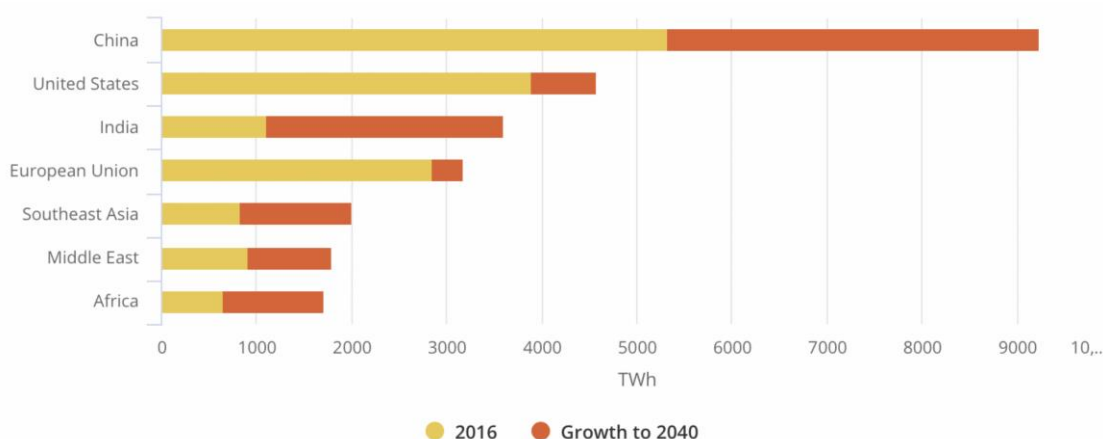


Figura 73: Aumento en la demanda de electricidad 2016/2040 [231]

4.2.5. Demanda de recursos minerales

La enorme importancia de asegurar el suministro de las materias primas para las actividades que se han descrito hasta ahora han llevado a la Comisión Europea al establecimiento de una lista de materias primas críticas (CRM) que identifiquen las necesidades de estos materiales para priorizar tanto la localización de mercados que puedan abastecer a la Unión Europea de estos materiales como la propia prospección en los territorios de estos países como en otras zonas en las que se puedan buscar. Estas zonas tendrían que ser aquellas que no estén bajo la jurisdicción de terceros países, lo que significa la prospección y búsqueda en aguas internacionales y en los polos.

La lista de materias primas críticas de la Comisión no es fija y se actualiza con el tiempo (Figura 74). La lista de 2017 contiene 26 materias primas, aunque como elementos individuales el número es mayor al figurar como agrupados las tierras raras pesadas y ligeras y metales del grupo del platino. Tiene nueve más que la de 2014 y trece más que la primera lista de 2011.

La metodología para establecer la criticidad de una determinada materia prima se basa en la correlación entre la importancia económica aplicando un factor de corrección que consiste en un índice de sustitución y el riesgo de suministro basado en la concentración de la materia prima en determinadas áreas, la forma de gobierno y la estabilidad políticas en dichas áreas, aspectos de mercado internacional y tasas de reciclado al final de la vida útil (Figura 75).

MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS 2017			
Antimonio	Europio	Iridio	Rodio
Barita	Fluorita	Iterbio	Rutenio
Berilio	Fosfatos	Itrio	Silicio metal
Bismuto	Gadolinio	Lantano	Tantalio
Borato	Galio	Lutecio	Terbio
Caucho natural	Germanio	Magnesio	Tulio
Cerio	Grafito natural	Neodimio	Vanadio
Cobalto	Hafnio	Niobio	Wolframio
Disprosio	Helio	Paladio	
Erbio	Holmio	Platino	
Escandio	Indio	Praseodimio	

Figura 74: Lista de Materias Primas Críticas (CRM) de la Comisión Europea (2017)
Elaboración propia a partir de [233]

En la actualidad el mayor proveedor a nivel mundial del mayor número de materias primas críticas es China, mientras que únicamente aparece Francia como el mayor suministrador tanto a nivel global como para la Unión Europea de Hafnio (Figura 76), usado en dispositivos de submarinos nucleares, en soldadura por plasma y en forma de óxido se usa como aislante eléctrico en microchips y en reacciones de polimerización mediante catalizadores de hafnio [234]. En el anexo I se indican los principales usos y aplicaciones de las materias primas críticas (Tabla 57).

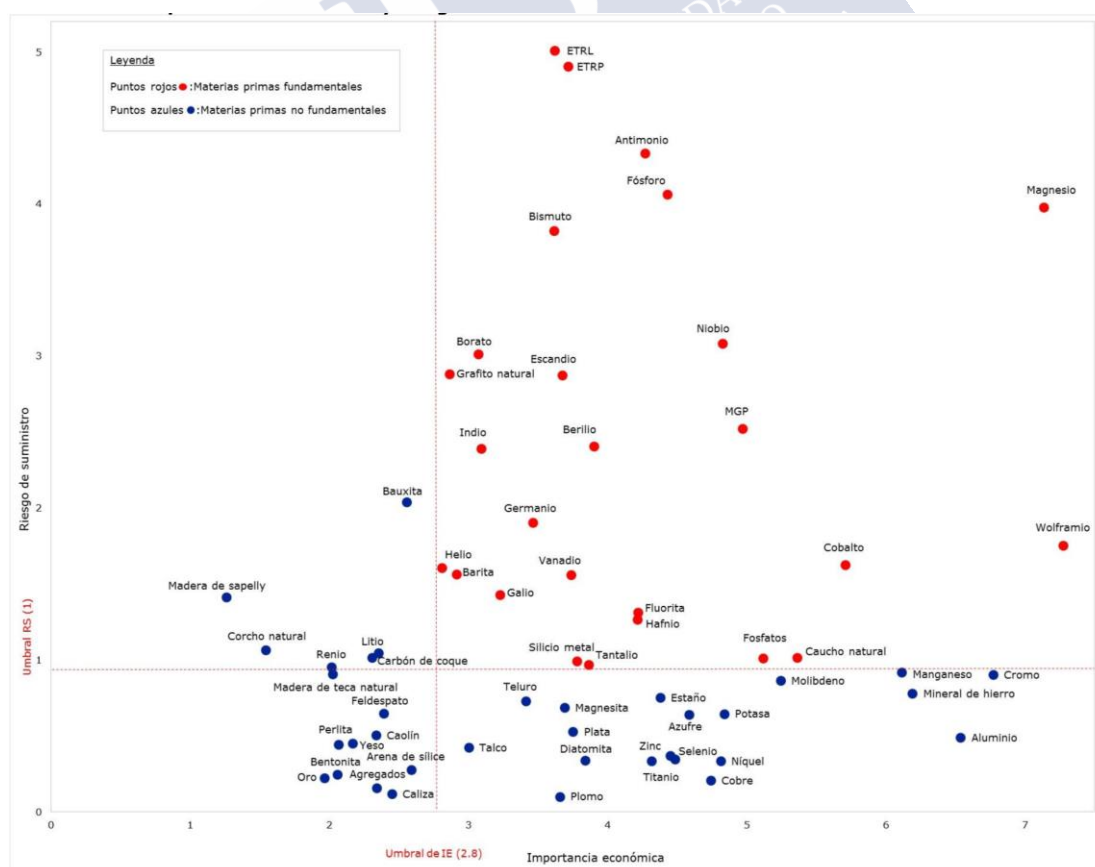


Figura 75: Nivel de criticidad de materias primas [233]

Countries accounting for largest share of global supply of CRMs

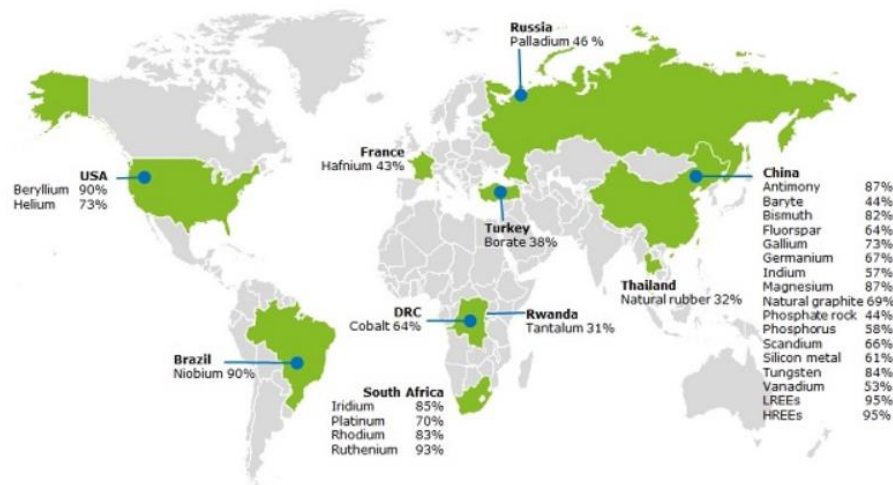


Figura 76: Países con mayores recursos de Materias Primas Críticas [233]

De forma similar a la Comisión Europea, el Departamento de Energía de los Estados Unidos elaboró también la Estrategia de Materiales Críticos para el sector energético, indicando por un lado los materiales asociados a la producción renovable y medidas de eficiencia energética (eólica, fotovoltaica, vehículos eléctricos e iluminación eficiente) y por otro lado las materias primas asociados a otros aspectos del sector energético: energía nuclear, almacenamiento en la red, disminución de peso en los vehículos, refrigeración magnética, turbinas gas, células de combustible y convertidores catalíticos (Figura 77) [235].

	Photovoltaic Films	Wind Turbines	Vehicles		Lighting		
MATERIAL	Coatings	Magnets	Magnets	Batteries	Phosphors		
Rare Earth Elements	Lanthanum			●	●		
	Cerium			●	●		
	Praseodymium	●	●	●			
	Neodymium	●	●	●			
	Europium				●		
	Terbium				●		
	Dysprosium		●	●			
	Yttrium				●		
	Indium	●					
	Gallium	●					
Tellurium	●						
Cobalt				●			
Lithium				●			
Manganese				●			
Nickel				●			
MATERIAL	Nuclear Power	Grid Storage	Vehicle Light-weighting	Magnetic Refrigeration	Gas Turbines	Fuel Cells	Catalytic Converters
Key Materials	Indium	●					
	Dysprosium			●			
	Praesodymium			●			
	Neodymium			●			
	Lanthanum					●	
	Cobalt	●				●	
	Cerium					●	●
	Yttrium					●	
Materials to Watch	Magnesium		●				
	Vanadium	●					
	Gadolinium	●					

Figura 77: Materias primas críticas US Department of Energy (2011) [235]

En contraste con la metodología usada por la Comisión Europea para establecer la criticidad de las materias primas, en este caso, se establece mediante la correlación entre el riesgo en el suministro frente a la importancia para las energías limpias (Figura 78).

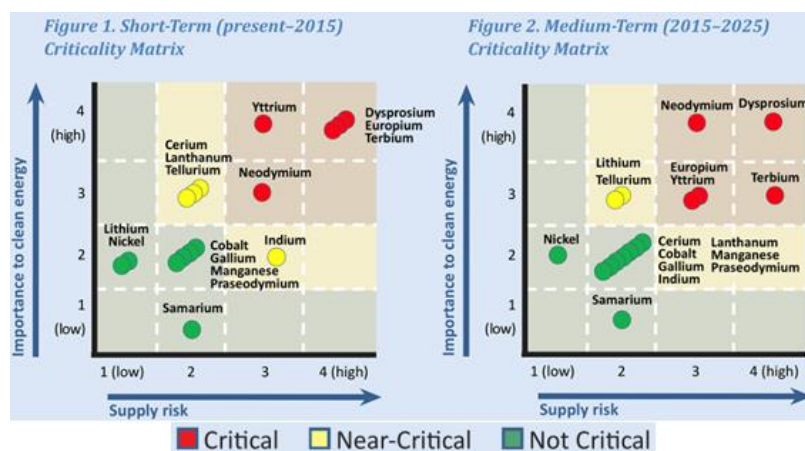


Figura 78: Criticidad materias primas críticas US Department of Energy
Adaptado de [235]

4.3. RECURSOS MARINOS

Como se indicaba anteriormente, los países que no dispongan de recursos minerales o energéticos propios se ven obligados a buscar a otros países proveedores de dichos recursos, o bien a realizar prospecciones en zonas que no estén bajo la jurisdicción de terceros países, es decir, las aguas internacionales y los polos. Hasta la fecha, los recursos minerales identificados en los fondos marinos provienen de tres fuentes: nódulos polimetálicos o de manganeso, sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto. En lo que respecta a los recursos energéticos marinos, además de los tradiciones, petróleo y gas, se ha identificado también los hidratos de gas.

4.3.1. Recursos marinos convencionales: Petróleo y Gas Natural

El petróleo es una sustancia orgánica y es una mezcla de diferentes hidrocarburos con pequeñas cantidades de impurezas y su composición varía dependiendo de su procedencia. Incluso dentro de una misma área geográfica la composición puede ser diferente en diferentes yacimientos.

La teoría más comúnmente aceptada para la formación del petróleo, denominada biogénica, es aquella que establece como origen la transformación de acumulaciones de materia orgánica, fundamentalmente restos de vida animal y vegetal [236], básicamente fitoplancton, zooplancton (especialmente foraminíferos y algunos crustáceos) y algas, constituidos básicamente por lípidos, proteínas, carbohidratos y en el caso de las plantas mayores por ligninas, siendo los lípidos los más significativos para la formación del petróleo. Los sedimentos ricos en materia orgánica tienen lugar sobre todo en ambientes acuáticos, ya que con la exposición aérea de los restos de materia orgánica son destruidos con facilidad por la oxidación química y la actividad microbiana [237]. Esta acumulación de materia orgánica enterrada a varios cientos de metros de profundidad constituye un sedimento denominado sapropel que, con la ayuda de calor y presión causada por los sedimentos de las capas superiores, acaban transformándose en petróleo [236].

En primer lugar, mediante la diagénesis, a través la acción combinada de actividad bacteriana, de las presiones existentes a estas profundidades, de temperaturas no superiores a 65° C y en condiciones anaerobias que impidan la proliferación de formas de vida que destruya la materia orgánica acumulada, se producirá la transformación de los

biopolímeros (proteínas, lípidos, carbohidratos y ligninas) en geopolímeros denominados genéricamente kerógeno [237]. El kerógeno no es una sustancia homogénea y su composición depende la materia orgánica predominante que lo originó, distinguiéndose cuatro tipos dependiendo de su contenido en hidrógeno y carbono, obteniendo, por tanto, diferentes combinaciones de petróleo y gas [238].

A partir de 65° C se produce la catagénesis en la que se destila el kerógeno a partir de la rotura de las moléculas orgánicas para formar cadenas de hidrocarburos que seguirán rompiéndose a medida que aumenta la temperatura. La generación del petróleo tiene lugar (ventana de petróleo) fundamentalmente en el entorno de los 100° C. Al final de este proceso, a los 150° C, quedan hidrocarburos gaseosos, entre metano y pentano. Tras pasarlo el umbral de 150° C se inicia la metagénesis. El poco gas generado por el kerógeno es exclusivamente metano y el aumento de temperatura sigue rompiendo los hidrocarburos existentes en cadenas aún más cortas hasta obtener metano y la fracción orgánica restante se convierte en grafito. Esta etapa finaliza a los 200° C (Figura 79) [238].



Figura 79: Teoría biogénica de la formación del petróleo y del gas (elaboración propia)

Otra teoría para la formación del petróleo y el gas es la teoría abiogénica según la cual los hidrocarburos se forman a partir de depósitos profundos de carbono existentes a partir de la formación del planeta en forma de mezclas de moléculas de hidrocarburos que al filtrarse hacia arriba a través de la corteza y atravesar zonas arrastran microorganismos extremófilos que justificarían la presencia orgánica en el crudo.

En general el petróleo y el gas natural se encuentra en rocas de grano grueso, porosas y permeables, como arenisca y carbonatos [237] (caliza, dolomita), denominadas rocas almacén a donde llega mediante un proceso denominado migración primaria procedente de la roca madre, rica en materia orgánica [236] (lutitas y carbonatos) [237].

Para que tenga lugar la acumulación de petróleo y gas natural debe existir una roca sello que evite el escape del crudo de la roca almacén. Esta configuración formada por la roca madre, la roca almacén y la roca sello se denomina trampa. Además del crudo recibido de la roca madre en las trampas de acumula petróleo y gas procedente de flujos continuos a través de fracturas, fallas o rocas saturadas de agua en un proceso conocido como migración secundaria [236]. Esta migración secundaria es también el movimiento del petróleo y el gas a través de las rocas almacén (Figura 80).

Existen diversos tipos de trampas. Las trampas estructurales son las debidas a fallas o a pliegues anticlinales [236]. Las trampas estratigráficas están generadas por cambios en la porosidad de las rocas que hacen que desaparezca su continuidad (Figura 81).

Los principales componentes del petróleo y del gas natural son el carbono y el hidrógeno en forma de hidrocarburos, diferenciándose ambos por el tamaño de las moléculas ya que

cuando estas tienen de 1 a 4 átomos de carbono el hidrocarburo se presenta en forma de gas y a partir de cinco ocurre como líquido. En el caso del gas natural sus componentes son metano (CH_4) con entre un 70 a 98%, etano (C_2H_6) entre 1 y el 10%, propano (C_3H_8) con trazas hasta un 5% y butano (C_4H_{10}) con trazas hasta el 2%.

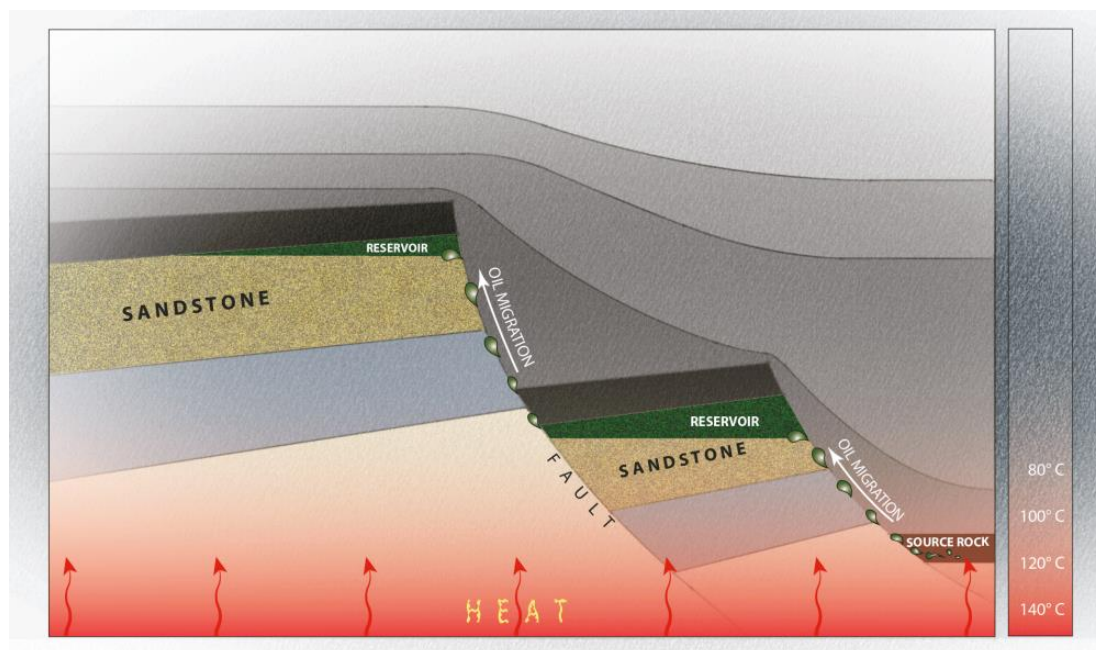
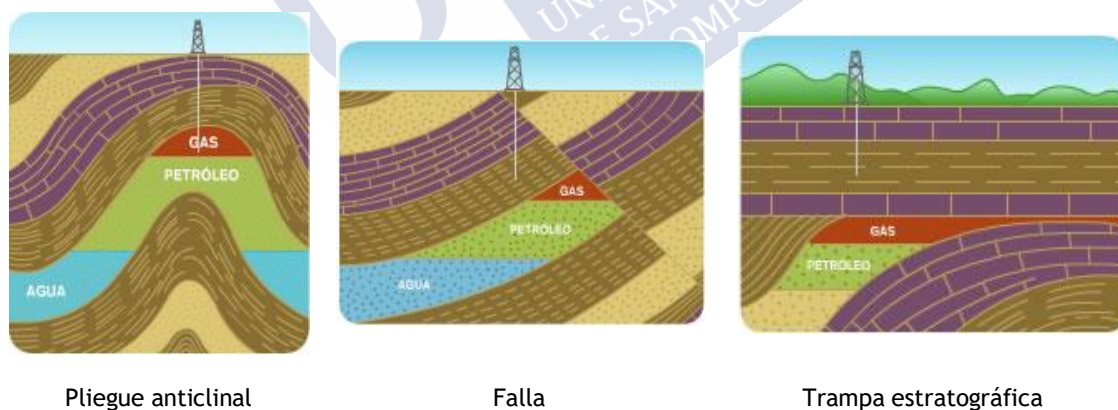


Figura 80: Migración del crudo y almacenamiento en las trampas [239]



Fuente: Ente Vasco de la Energía

Figura 81: Tipos de Trampas [240]

En el caso del crudo sus componentes fundamentales son el carbono (80-87%) e hidrógeno (10-15%), que están presentes en forma de hidrocarburos: parafinas o alcanos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) en los que si la molécula tiene 18 o más átomos de carbón sería una cera, naftenos o cicloparafinas (C_nH_{2n}), aromáticos ($\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$) y asfálticos con más de 40 átomos de carbono [241]. También están presentes cantidades inferiores de azufre (0-10%), nitrógeno (0-1%) y oxígeno (0-5%) [242]. Aunque en cantidades inferiores, la presencia de estos elementos tiene consideraciones muy significativas, siendo el azufre el más importante en el proceso del refino [243] y el control de los compuestos del azufre (SCC,

sulfur-containing compounds) es fundamental para la posterior obtención de combustibles y otros productos refinados bajos en azufre. En este sentido cabe destacar la importancia de la emisión de óxidos de azufre, SO_2 y SO_3 , debida a la combustión de combustibles, que al liberarse en el aire puede combinarse con ozono, otros gases y partículas para generar smog sulfuroso peligroso para la salud humana, lo mismo que varios compuestos heterocíclicos de azufre que son sospechosos de carcinógenos o mutagénicos por lo que diferentes países han limitado el contenido de azufre de los combustibles a 10 ppm (Unión Europea desde 2008, China desde 2016 y Estados Unidos desde 2017) [244]. El nitrógeno también puede tener efectos perjudiciales para el proceso de refino [243]. Además de los componentes ya citados el crudo tiene concentraciones muy variadas a nivel de trazas de vanadio, níquel, hierro, aluminio, sodio, calcio, cobre y uranio [242].

Tabla 42: Composición química del gas natural [241]

Metano (CH_4)	70 a 98%
Etano (C_2H_6)	1 a 10%
Propano (C_3H_8)	Trazas hasta 5%
Butano (C_4H_{10})	Trazas hasta 2%

Tabla 43: Composición química del crudo [242]

Carbono	80-87%
Hidrógeno	10-15%
Azufre	0-10%
Nitrógeno	0-1%
Oxígeno	0-5%
V, Ni, Fe, Al, Na, Ca, Cu, U	Trazas

Tabla 44: Media y Rango de la fracción de masa de hidrocarburos en el crudo [241]

	Fracción de masa	Rango de fracción de masa
Parafinas o alcanos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)	30	15-60
Naftenos o cicloparafinas (C_nH_{2n})	49	30-60
Aromáticos ($\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$)	15	3-30
Asfálticos	6	restos

Como se ha visto los diferentes componentes del crudo están presentes de forma muy variable, lo que le proporciona características diferentes entre diferentes extracciones. Una de las principales formas de comparación entre crudos es a través de la densidad y el contenido de azufre, esto último ya visto anteriormente. La forma más común de expresar la densidad en el petróleo es mediante la gravedad API (*American Petroleum Institute Gravity*) que es una forma de medición de la densidad relativa respecto al agua por lo que nos da una medida de si el crudo es más o menos ligero o pesado. El valor de gravedad API para el agua es 10, mientras que para el petróleo está entre 5 y 55 (Tabla 45) [241].

La importancia dentro del sector de la gravedad API no implica que no existan referencias a la densidad específica o relativa, el punto de ebullición y el punto de fluido (*pour point*) que es la temperatura más baja a la cual el crudo todavía fluye antes de solidificarse y es un indicativo del contenido de ceras (moléculas de parafinas con 18 o más átomos de carbono). A medida que aumenta el valor (los valores están entre 52° C y -59° C) más alto es el contenido en cera. El contenido de ceras en el crudo está relacionado

con su color de forma que los crudos con contenidos altos tienden a amarillo, los ligeramente altos un color verdoso y los de bajo contenido son negros [241].

Tabla 45: Valores de gravedad API para diferentes crudos [241]

	°API	Características de petróleo
Rango de valores para el crudo	5 - 55	
Valores medios	25 - 35	
Crudos ligeros	35 - 45	Muy fluido y a menudo transparente. Es el más valioso.
Crudos pesados	< 25	Muy viscoso con color oscuro y con un contenido considerable de asfalto. Es el menos valioso.

Derivado de lo visto hasta ahora acerca de la composición y las propiedades que caracterizan al crudo y al gas natural, se ha desarrollado una terminología que en algunos casos es descriptiva y en otros trata de clasificar la sustancia en función de sus propiedades [236]:

- El **crudo o petróleo convencional** es aquel se puede obtener mediante bombeo como un líquido fluido libre.
- El **gas natural** es una mezcla gaseosa inodora y es predominantemente metano, pero contiene otros compuestos, tanto hidrocarburos como otros compuestos. El **gas natural asociado** es el que se encuentra asociado al crudo en yacimientos ya sea libre formando una cubierta de gas en contacto con el crudo y la roca sello o disuelto en el crudo (**gas disuelto**). En función de la proporción de los diferentes hidrocarburos que lo forman distinguiríamos entre **gas seco** en el que contiene pocos hidrocarburos diferentes al metano y el **gas húmedo** que contiene cantidades importantes de etano, propano y butano. Teniendo en cuenta el contenido en compuestos del azufre, sobre todo ácido sulfhídrico (H_2S), se distingue entre el **gas amargo** (*sour gas*), que es el que lo contiene y el **gas dulce** (*sweet gas*) que no lo contiene o en cantidades muy bajas.
- El **gas condensado** está formado por hidrocarburos de peso molecular mayor (C_5 a C_8) existentes en el yacimiento como componentes del gas natural pero que se recuperan como líquidos en instalaciones.
- Los **hidratos de gas** se forman cuando, en determinadas condiciones de presión y temperatura, las moléculas de agua forman jaulas de hielo alrededor de moléculas de gas. En la industria del petróleo y el gas convencional con compuestos no deseados ya que pueden provocar bloqueos en tuberías, válvulas y en operaciones de perforación.
- Los **crudos aprovechables o de oportunidad** son aquellos con posibles problemas de procesamiento. Frecuentemente son crudos pesados con elevado contenido sólido y valores altos de acidez, viscosidad, contaminantes o conductividad eléctrica.

- El **crudo pesado** tiene un valor muy alto de viscosidad que dificulta su extracción en relación con el crudo convencional. Tienen valores bajos de gravedad API (menores de 20 a 25° API). El término también se ha utilizado para referirse al crudo que requiere de estimulación térmica para ser extraído e incluso a betunes presentes en arenas bituminosas, aunque en este caso se hablaría ya de **crudo extrapesado**.

4.3.2. Reservas de petróleo y gas natural

Se disponen de diferentes términos para definir las reservas [236], [245]:

- Reservas probadas: Cantidades estimadas de recurso que mediante análisis de datos geológicos y de ingeniería demuestran con certeza razonable que es recuperable bajo las condiciones económicas y operativas existentes. La ubicación, cantidad y graduación del recurso se considera generalmente bien establecida en dichas reservas.
- Reservas probables: Cantidades estimadas de recurso que, sobre la base de la evidencia geológica que respalda proyecciones de reservas probadas, puede esperarse razonablemente que existan y sean recuperables en las condiciones económicas y operativas existentes.
- Reservas posibles: Son aquellas con un menor grado de incertidumbre que las reservas probables, pero sobre las que hay alguna información.
- Reservas potenciales: Basadas en información geológica sobre los tipos de sedimentos donde es probable que haya recursos.
- Reservas inferidas: Los datos son considerados con un grado más alto de precisión que en el caso de las reservas potenciales. También se utiliza para referirse a reservas que podrán ser recuperadas mediante desarrollos tecnológicos posteriores.
- Reservas no descubiertas: Datos muy especulativos y considerados por muchos científicos como datos con muy poco valor.

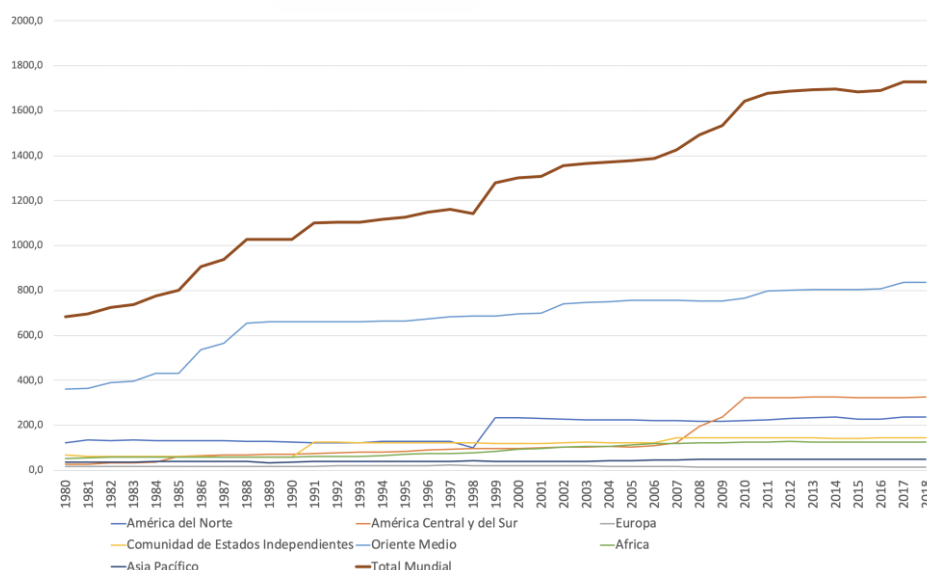


Figura 82: Evolución de las reservas mundiales de petróleo (miles de millones de barriles)
Elaboración propia a partir de [34]

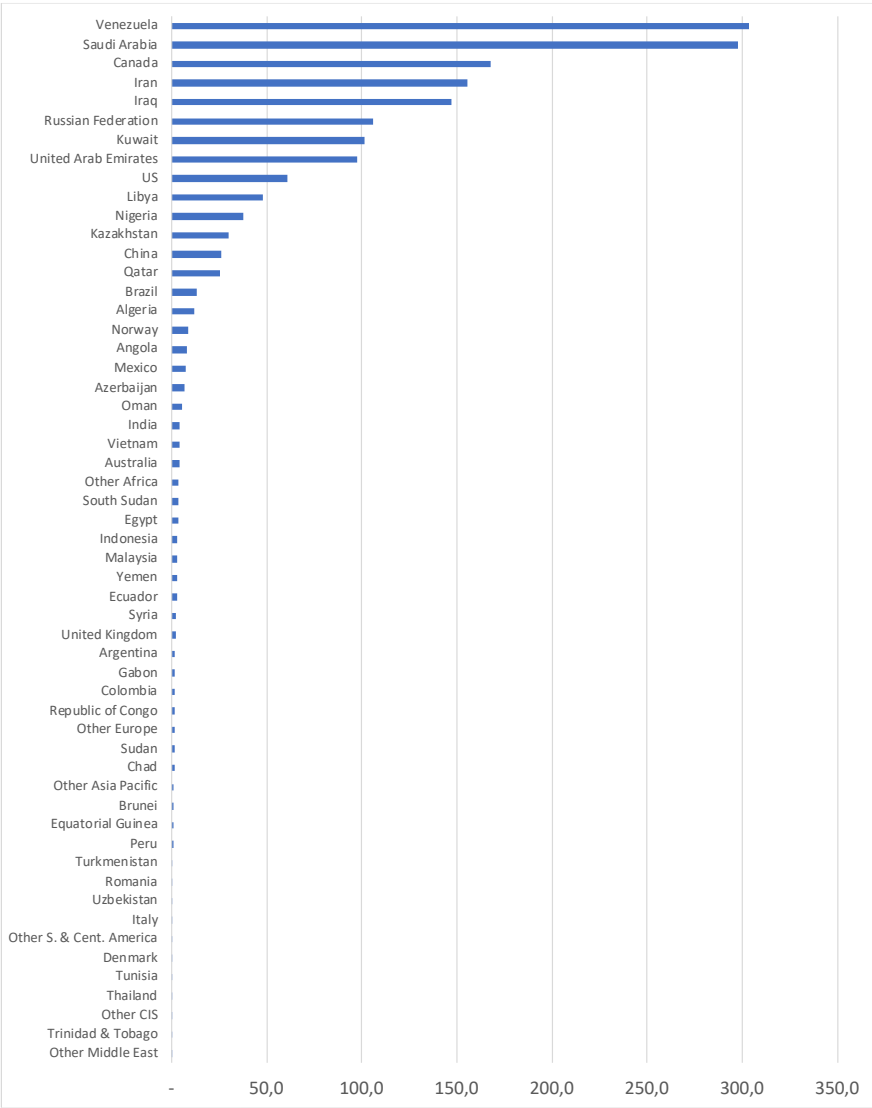


Figura 83: Reservas probadas de petróleo por países (miles de millones de barriles, 2018)
Elaboración propia a partir de [34]

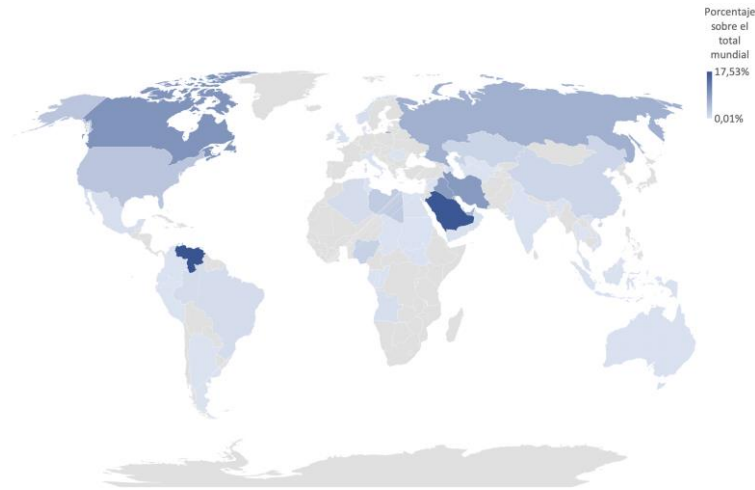


Figura 84: Reservas probadas de petróleo por países (porcentaje, 2018)
Elaboración propia a partir de [34]

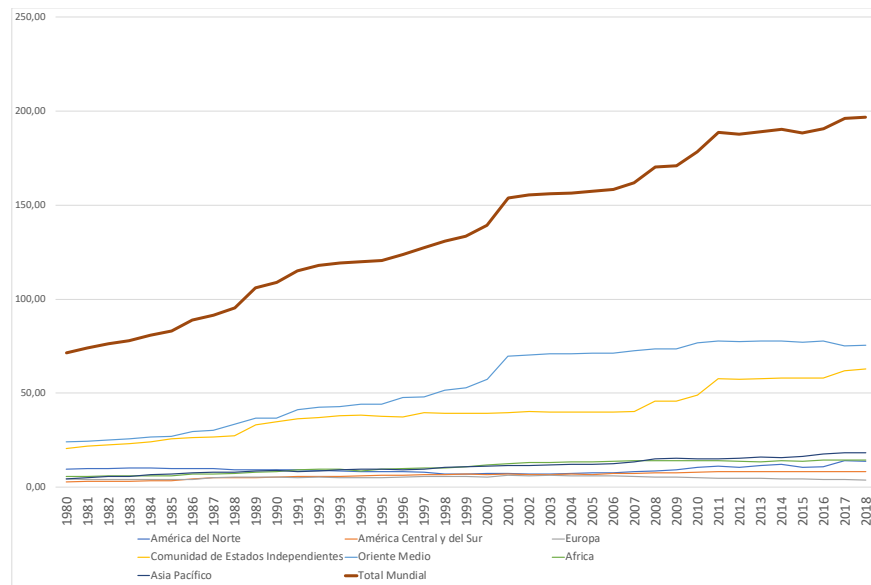


Figura 85: Evolución de las reservas mundiales de gas natural (billones de metros cúbicos)
Elaboración propia a partir de [34]

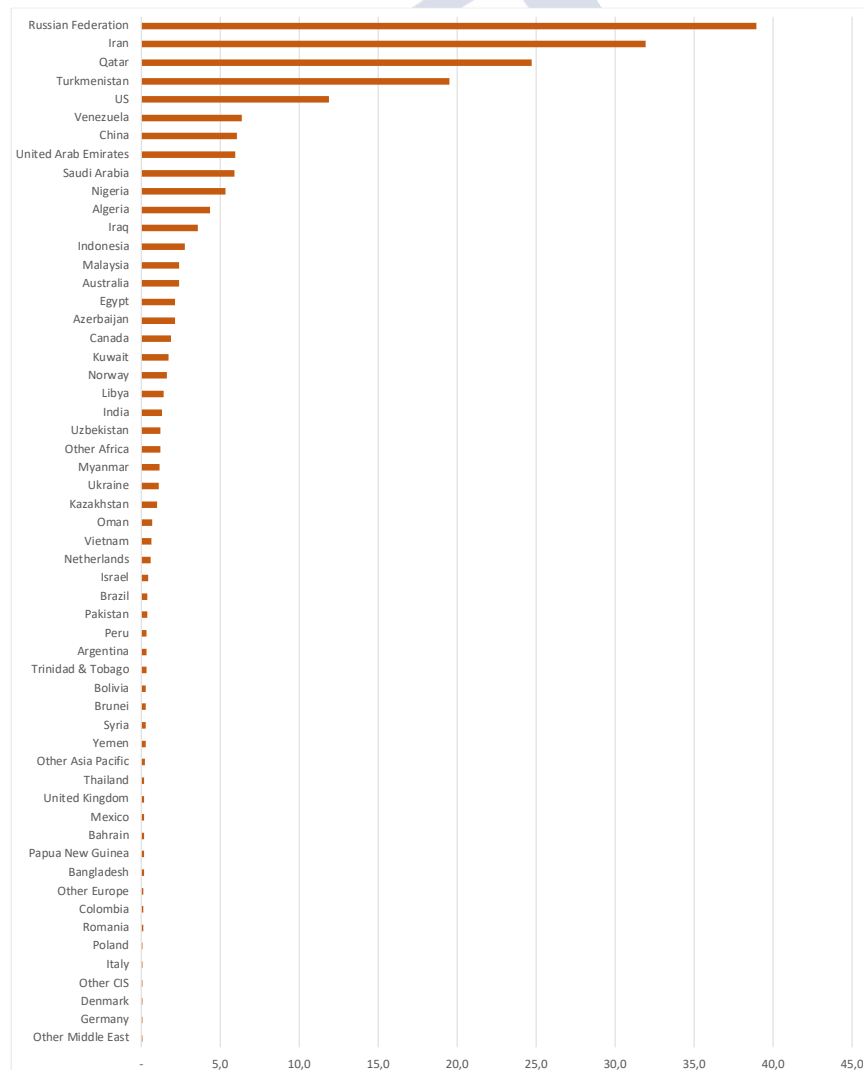


Figura 86: Reservas probadas de gas natural por países (billones de metros cúbicos, 2018)
Elaboración propia a partir de [34]

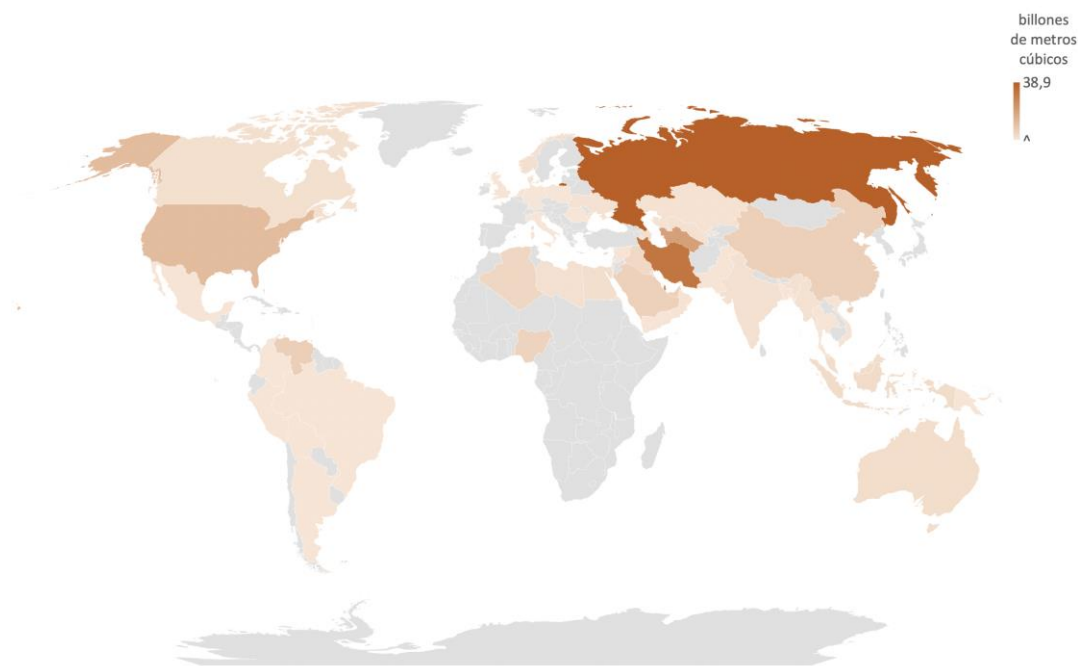


Figura 87: Reservas probadas de gas natural por países (porcentaje países, 2018)
Elaboración propia a partir de [34]

De los datos de reservas probadas disponibles se desprende un crecimiento sostenido a nivel mundial. Al ser un recurso no renovable, o por lo menos no renovable a escala humana al requerir su formación entre decenas y millones de años, cabe preguntarse los límites de disponibilidad del petróleo. Este es un asunto que lleva en cuestión desde hace décadas y ya en 1956 Hubbert predijo alcanzar el máximo de producción de petróleo en el año 2000 a nivel mundial y en el entorno de 1965 en Estados Unidos [246]. En esta publicación se predice que, una vez alcanzado el valor máximo de producción, la caída sería similar a los incrementos en la producción, creando una curva sensiblemente simétrica. Este valor máximo de producción es lo que se conoce como *peak oil* y es objeto de controversia sobre todo en períodos de incertidumbre como subidas continuadas del precio del petróleo y en situaciones de inestabilidad geopolítica en las principales zonas de reservas y producción. En definitiva la cuestión sería la relevancia de este concepto, es decir, si realmente lo único que se produce es un desplazamiento en el tiempo y en las cantidades de producción de la curva de Hubbert (Figura 88), pero que el máximo se alcanzará y la caída de la producción no cubrirá las necesidades dentro de un ámbito temporal en el que el petróleo sea tecnológicamente relevante (que se prevé que lo sea en varias décadas), o si por el contrario no es relevante porque habrá suficiente petróleo disponible mientras tecnológicamente sea necesario.

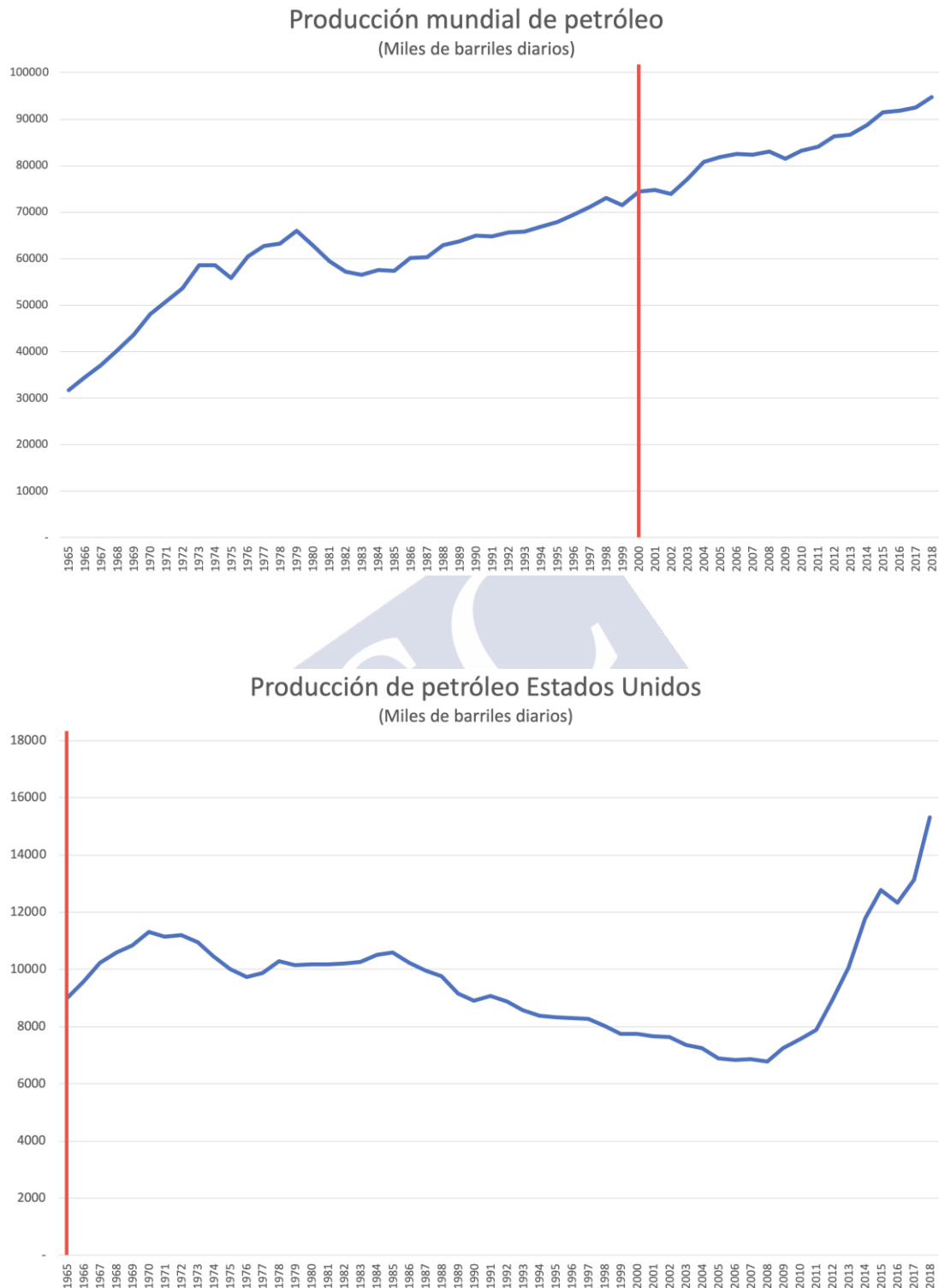


Figura 88: Producción mundial y de Estados Unidos de petróleo (miles de barriles diarios, 2018) con el *peak oil* de Hubbert señalado en rojo
Elaboración propia a partir de [34]

4.3.3. Demanda y producción de petróleo y gas natural

El pico del petróleo no es solo una cuestión de reservas conocidas, sino también de crecimiento de la demanda y de producción petrolífera (Figura 90). En lo que respecta a

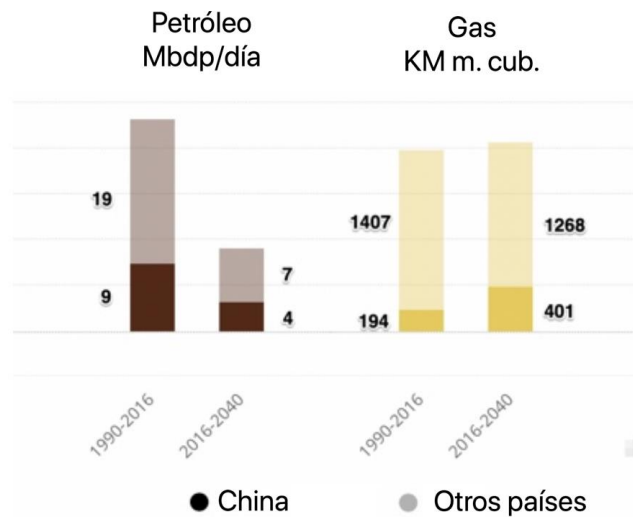
la demanda, las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía [230] prevén un crecimiento en el período 2016-2040 de hasta 11 millones de barriles diarios, de los que el 36 % corresponden a China. Este crecimiento no es tan intenso como lo fue en el período 1990-2016, que fue de 28 millones de barriles al día (del que el 32% correspondió a China), pero aún así el crecimiento en la demanda de petróleo es intenso (Figura 89). Con ligeras diferencias las previsiones de la OPEP confirman tanto este crecimiento como su distribución regional [247]. Sin embargo, el crecimiento de la demanda a lo largo del período 2015-2040 no es uniforme y se aprecia claramente una ralentización de dicho crecimiento. En los cinco primeros años del período (2015-2020) tendría lugar alrededor del 47% de todo el incremento; en la siguiente década (2020-2030) se produciría en torno al 36% de todo el incremento y la última década (2030-2040) significaría únicamente en torno al 17% del total de incremento. En definitiva, y según estas previsiones, aunque la no dependencia del petróleo está muy lejos hay señales muy claras de un estancamiento en el aumento de la demanda tras pasado el límite de 2040.

Ambas previsiones confirman el aumento de la demanda de gas natural y de forma mucho más intensa que en el caso del petróleo. El crecimiento de este recurso durante el período 2016-2040 no solo igualaría al del período 1990-2016 sino que lo superaría muy ligeramente, 1669 mil millones de metros cúbicos de gas frente a 1601, y al contrario de lo que sucede con el petróleo el ritmo de crecimiento de la demanda no solo no disminuye a lo largo del período considerado sino que en un primer término se produce un aumento muy elevado en la demanda y en el último término se mantiene el aumento en los mismos términos. En principio, el período 2015-2020 supondría en torno a un 21% del total, mientras que los períodos 2020-2030 y 2030-2040 supondrían un 39% y un 40% del incremento respectivamente.

El incremento de la demanda de petróleo para el período 2017-2040 no se distribuye de forma uniforme en todo el mundo y se pueden distinguir claramente dos zonas, los países desarrollados de la OCDE y los países en desarrollo (Figura 88). En el caso de los países de la OCDE únicamente se dan ligeros incrementos en la demanda en la aviación y en los derivados del petróleo. En el caso de los países en desarrollo, a excepción de en la generación eléctrica donde se produce un ligero descenso, en el resto de los sectores se produce un aumento de la demanda entre moderado y muy alto, destacando el peso de los vehículos y con incrementos proporcionalmente similares, los derivados del petróleo y los usos residenciales y comerciales, aunque con mucho menos peso dentro del conjunto de la demanda que los vehículos.

En lo que respecta a la producción petrolífera, esta puede verse condicionada por las inversiones en exploración. Según estimaciones realizadas por la consultora Wood Mackenzie (WoodMac), 2018 es el quinto año consecutivo en el que caen estas inversiones, alcanzando este año los 37 mil millones de dólares, lo que supone un 7% menos que en 2017 y un 40% menos que en 2014. Ese año comenzó el descenso como consecuencia de la caída de los precios del crudo. Sin embargo, una vez recuperados los precios la inversión en exploración no parece recuperarse. A pesar de esto, parece que la actividad se mantiene debido a la bajada de costes y se priorizan las operaciones *offshore* de aguas profundas [248]. No obstante, esta falta de inversiones puede suponer un retraso en el descubrimiento de nuevos yacimientos y la consiguiente puesta en marcha de los que se descubran posteriormente.

Cambio en la demanda mundial de energía primaria por tipo de combustible



Cambio en la demanda global de petróleo por sector

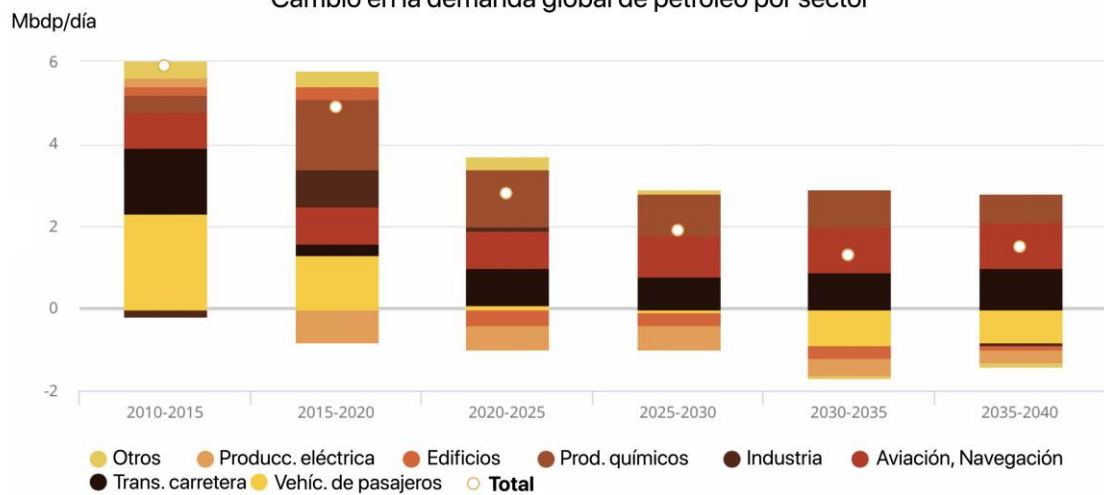


Figura 89: Crecimiento de la demanda de petróleo (millones de barriles de petróleo por día y miles de millones (billions) de metros cúbicos de gas)
Adaptado por el autor de [230]

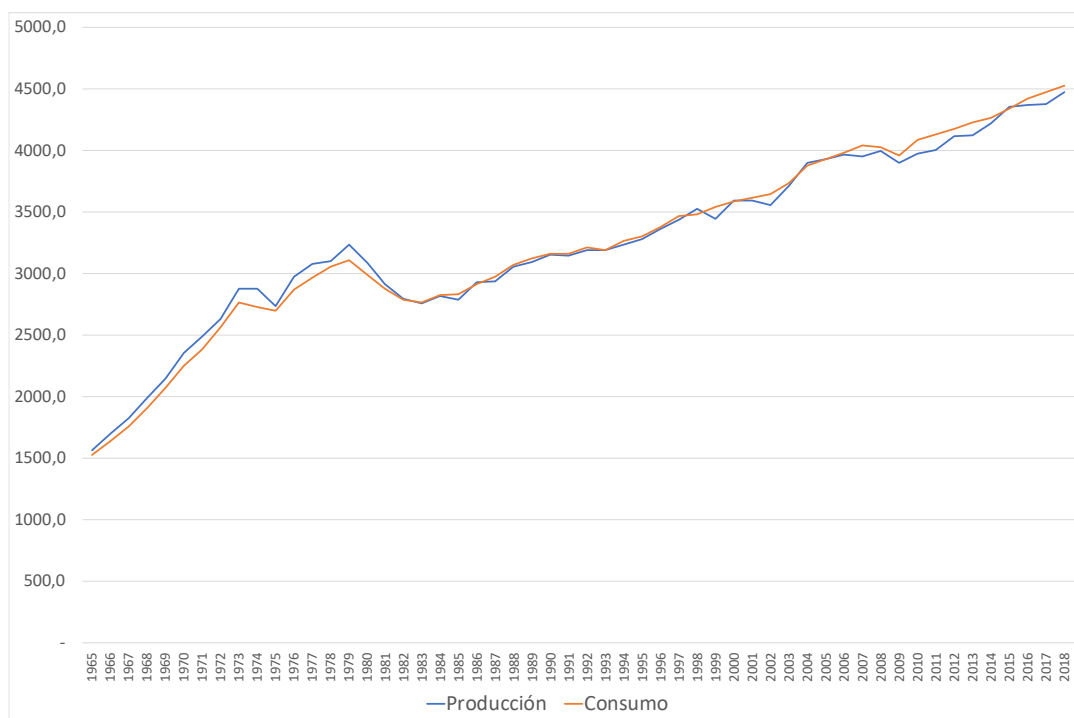


Figura 90: Producción mundial vs consumo mundial de petróleo (millones de toneladas) (2018)
Elaboración propia a partir de [34]

4.3.4. La actividad *offshore* convencional

La actividad relacionada con la explotación petrolífera y de gas natural en el mar se conoce como *offshore*. Esta actividad constituye una parte muy importante de la producción total de petróleo y gas natural, alcanzando en 2016 el 25%. En el caso del gas natural, el incremento de la producción *offshore* ha sido del 50% desde el año 2000, mientras que la producción de petróleo se ha mantenido estable desde ese año [208]. Aunque las instalaciones *offshore* están distribuidas por todo el planeta, las principales zonas de producción son Oriente Medio, el Mar del Norte, Brasil, el Golfo de México y el Mar Caspio [208].

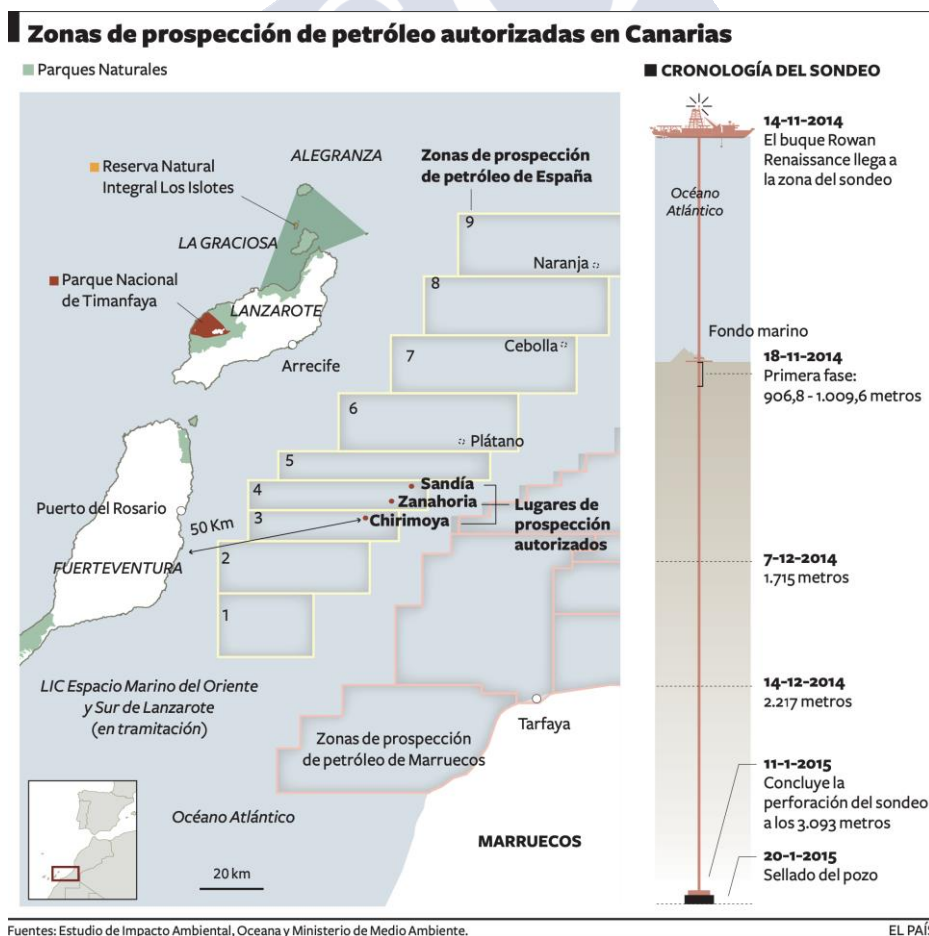
La actividad energética *offshore* en España es escasa en relación con los países productores de petróleo y gas. Esta actividad comenzó en 1968 con los primeros sondeos en el Mediterráneo. La primera instalación *offshore* en España fue Amposta, descubierta en 1971. En 1975 se descubrió Casablanca que, junto con sus yacimientos satélites, constituye la principal y prácticamente única producción *offshore* de petróleo en España (Tabla 46, Figura 92 y Figura 93).

Tabla 46: Descubrimientos comerciales *offshore* España
Elaboración propia a partir de [249]

Yacimiento	Año descubrimiento	Empresa	Producto extraído
Amposta	1971	Shell	Petróleo
Dorada	1975	Union Texas	Petróleo
Casablanca	1975	Chevron	Petróleo
Tarraco	1976	Shell	Petróleo
Poseidón	1978	Campsa	Gas

Yacimiento	Año descubrimiento	Empresa	Producto extraído
Gaviota	1980	Eniensa	Gas y Petróleo condensado
Salmonete (satélite Casablanca)	1984	Eniensa	Petróleo
Angula (satélite Casablanca)	1984	Eniensa	Petróleo
Albatros	1994	Repsol	Gas y Petróleo Condensado
Rodaballo, Chipirón y Boquerón (satélites Casablanca)	1995-1997	Repsol	Petróleo
Barracuda (satélite Casablanca)	2000	Repsol	Petróleo
Lubina (satélite Casablanca)	2009	Repsol	Petróleo
Montanazo (satélite Casablanca)	2009	Repsol	Petróleo

El último episodio relacionado con nueva actividad *offshore* en España ha sido la exploración realizada en Canarias (Figura 91). Las prospecciones realizadas entre noviembre de 2014 y enero de 2015, con una profundidad de pozo de unos 2.200 m en la zona denominada Sandía, no dio resultados satisfactorios y la empresa concesionaria, Repsol, decidió no continuar con las prospecciones.



Fuente: El País

Figura 91: Zonas de prospección en Canarias [250]

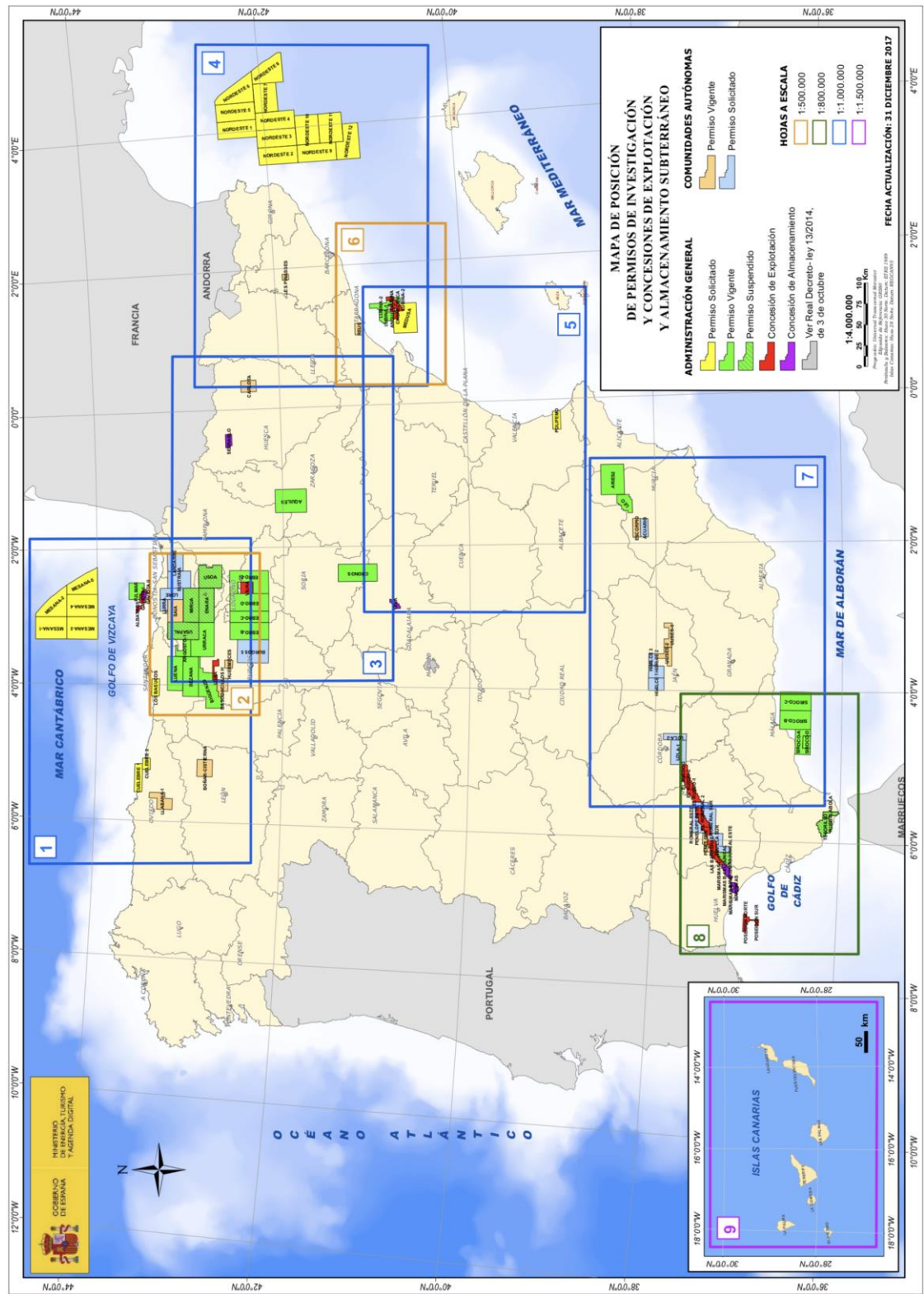


Figura 92: Mapa de posición de permisos de investigación y concesiones de explotación y almacenamiento subterráneo (2017) [251]

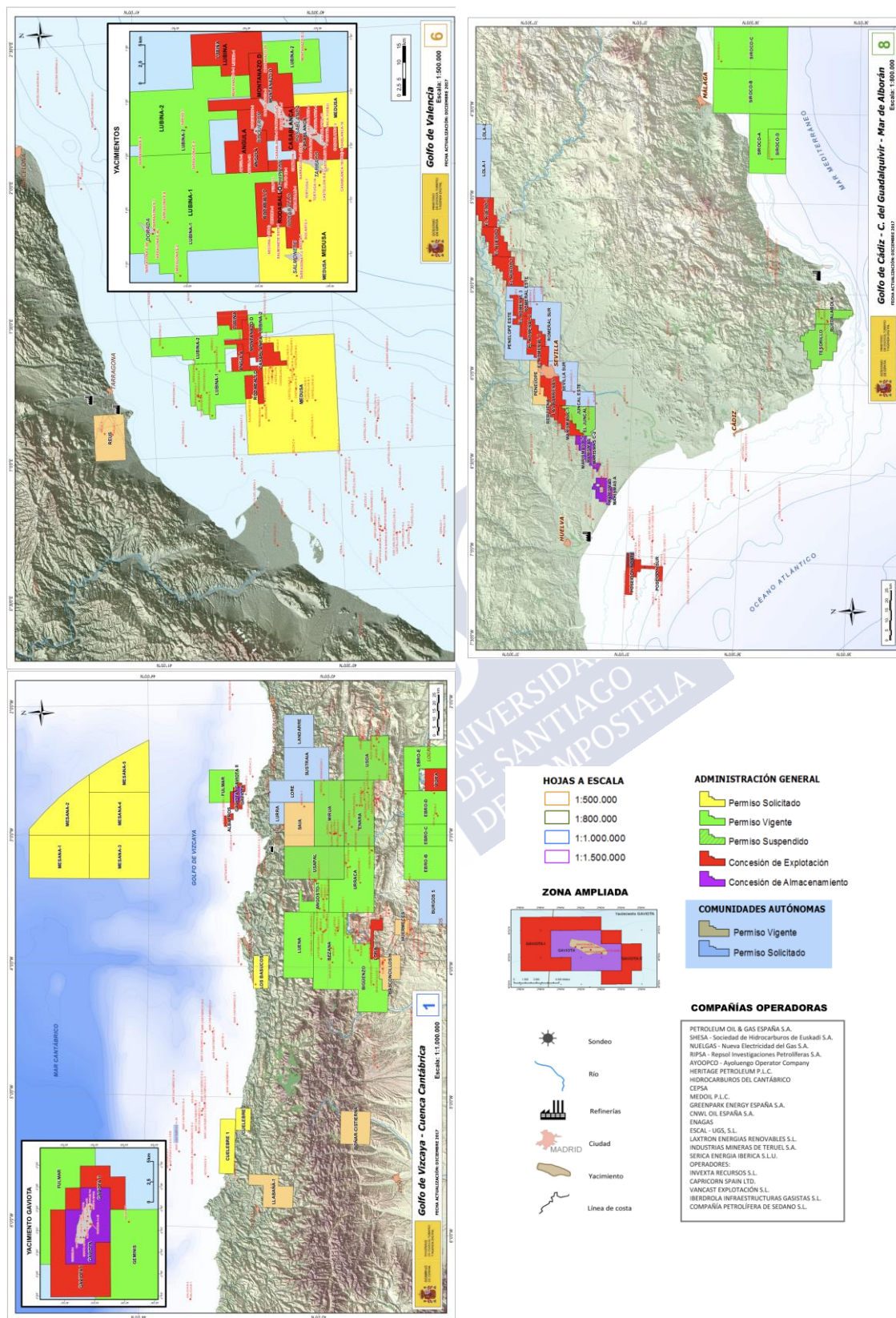


Figura 93: Mapa de posición de permisos de investigación y concesiones de explotación y almacenamiento subterráneo - Detalles (2017) [251]

En lo que respecta a Galicia, los primeros trabajos exploratorios tuvieron lugar en los años 70. El 18/12/1973 el periódico La Voz de Galicia publicaba el inicio inminente de prospecciones petrolíferas en la costa de Baiona (Figura 94). El proyecto fue denominado “Baiona Marina” y tenía un alcance de 35.671 hectáreas de fondo marino. La prospección fue realizada por la empresa Ranger Oil [252]. Los indicios para la búsqueda de petróleo fueron, según los promotores de la prospección, las similitudes de la plataforma continental gallega con la del Mar del Norte y finalmente Ranger Oil registró 1.200 km de adquisiciones sísmicas [253].

A partir de 1978 es ENIEPSA (Empresa Nacional de Investigación y Explotación de Petróleo) comienza a realizar prospecciones en las que se habrían descubierto dos bolsas en el subsuelo (una a 10 millas al oeste del cabo Home y otra frente a la desembocadura del Miño) y continuarían posteriormente en 1984 con la plataforma Benreoch transportada desde Nueva Zelanda por el buque Mighty Servant III [254]. ENIEPSA disponía desde 1982 de permisos para prospecciones desde la ría de Arousa hasta el límite con Portugal sumando 250.000 hectáreas de superficie (Figura 95) [253]. Durante los años 80 Hispanoil (actualmente integrada en Repsol) realizó 1.700 km de adquisición sísmica y una perforación de 3.500 m de profundidad frente a Vigo [255].



Fuente: La Voz de Galicia

Figura 94: Noticia de prensa sobre el inicio de prospección [256]

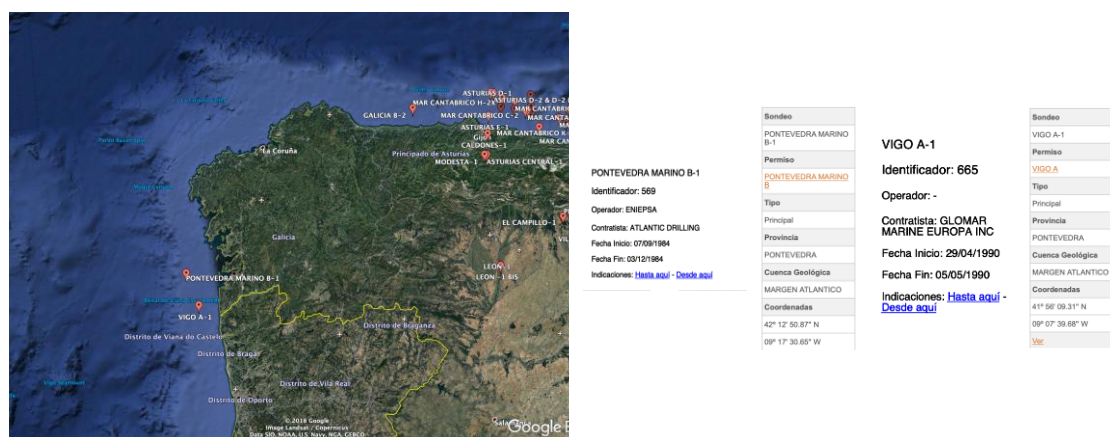


Figura 95: Sondeos Pontevedra Marino B-1 y Vigo A-1 [257]

A comienzos de los años 90 la Administración Autonómica Gallega se implica en la búsqueda de petróleo en la plataforma continental gallega y del norte de Portugal. En 1993 la empresa sueca Taurus Petroleum realizó estudios en la costa norte de Portugal. En octubre se firma un convenio de colaboración con la Xunta de Galicia por importe de 1,80 millones de Euros. Taurus realizó sondeos entre 2.000 y 2.700 m de profundidad y se localizaron estructuras compatibles con la presencia de hidrocarburos. Además de Taurus, en las prospecciones intervinieron Global Marine, Hope Petróleos y Galioil, empresa creada en 1.994 por la Xunta de Galicia. La Xunta tenía el 46% de los derechos de explotación frente a la costa gallega (Vigo, Arousa y Muros) y el 30% frente a la costa portuguesa (Salmao, Boga, Truta y Sarda). Entre octubre de 1994 y enero de 1995 la plataforma Kings North Explorer propiedad de la empresa estadounidense Challenger realizó perforaciones a 38 millas de Viana do Castelo (Portugal) que, aunque sin resultados positivos se seguían obteniendo indicios de la presencia de hidrocarburos [253] [258]. Galioil se liquidó en 2005 y los últimos sondeos realizados hasta el momento en la costa gallega de realizaron en 2004 y 2006 por Taurus y ENI-EPSA en Vigo A-1 y Pontevedra Marino B-1 [253].

4.3.4.1. Exploración de petróleo y gas natural

Aunque la fase de exploración siempre termina con una perforación para comprobar la existencia del recurso, previamente se desarrollan trabajos para localizar su posible presencia. Los trabajos previos consisten fundamentalmente en una exploración sísmica, aunque actualmente existen también otros recursos, aunque con menor fiabilidad, como son la exploración magnética y la exploración gravimétrica. Una vez finalizada esta fase de la exploración, previamente a la perforación todavía es necesario realizar un cartografiado del fondo marino para determinar la forma más adecuada de afrontar la perforación.

Exploración sísmica.

La secuencia exploración-extracción-transporte comienza con la identificación de los potenciales yacimientos de petróleo y gas natural utilizando diversas tecnologías, entre las que destaca la exploración sísmológica, basada en la medición del tiempo que tardan en atravesar las ondas acústicas generadas, por ejemplo, con cañones de aire

comprimido, los diferentes estratos del subsuelo del fondo marino ya que la fuerza y la velocidad de las ondas está afectada por las características de los diferentes estratos del subsuelo. Las ondas reflejadas son recogidas por sensores denominados hidrófonos y los datos obtenidos son procesados para la obtención de las imágenes que serán interpretadas por los geólogos para determinar la presencia de los yacimientos, sino también de las características del subsuelo que posteriormente es necesario conocer para la perforación. Los hidrófonos se instalan en cables (hasta 3500 hidrófonos por cable) que son remolcados por un barco. La adquisición sísmica realizada por un cable de hidrófonos a lo largo de una determinada distancia se conoce como exploraciones sísmicas de tipo 2-D. Actualmente, las adquisiciones sísmicas son de tipo 3-D, que consisten en realizar varias adquisiciones 2-D en una determinada superficie (Figura 96), por lo que si se aumenta el número de cables (hasta 18) en paralelo arrastrados por la embarcación disminuye el tiempo y el coste del proceso de exploración sísmica. La velocidad de desplazamiento de la embarcación durante el levantamiento está entre 4,5 a 5 nudos (de 8,3 a 9,3 km/h) y las ondas sonoras producidas por los cañones de aire comprimido son activadas cada 10 o 15 segundos en sentido vertical y con una amplitud de 220 a 260 dB. El tiempo de prospección varía en función de las condiciones climáticas y de las características de las diferentes zonas marítimas. En este sentido, una exploración en la zona de África Occidental se realizaría en un ratio de 19 a 23 mi²/d (50 a 60 km²/d), mientras que esa misma exploración realizada en verano en el Mar del Norte se realizaría en un ratio de 9,6 a 11,6 mi²/d (25 a 30 km²/d) [259].

Ya no como herramienta de exploración sino de producción, la adquisición sísmica se puede repetir a lo largo de determinados períodos de tiempo para comprobar los cambios en el yacimiento. Estaríamos hablando de adquisición sísmica 4-D.

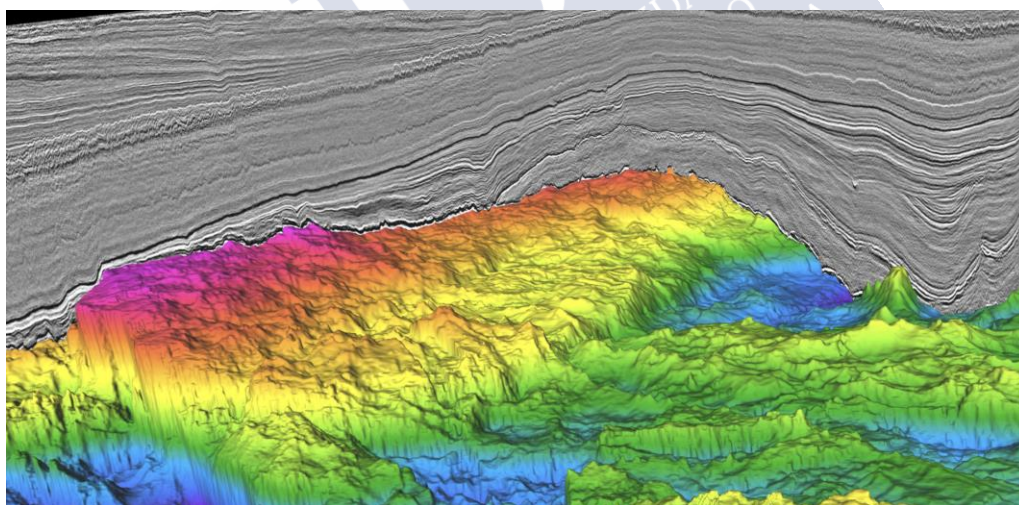


Figura 96: Imagen obtenida de la exploración sísmica [260]

Además de la exploración sísmica existen otras dos técnicas previas a la perforación. Aunque no dan resultados tan detallados ni fiables como la adquisición sísmica, son útiles para formarse una idea general de la zona de exploración.

Por un lado, la exploración magnética realiza mediciones en la intensidad de campo de la localización mediante un magnetómetro instalado en una avioneta que sobrevuela el área. Estas variaciones de campo pueden dar información preliminar de la estructura del subsuelo del fondo marino ya que las formaciones sedimentarias susceptibles de

almacenar hidrocarburos no tienen propiedades magnéticas, mientras que las rocas ígneas y algunas metamórficas tienen estas propiedades.

Por otro lado, la exploración gravimétrica mide la variación de densidad en las diferentes rocas con referencia al campo gravitacional de la tierra.

Otra actuación necesaria previamente a la perforación es la realización de un levantamiento topográfico del fondo marino que proporciona información necesaria para la instalación posteriormente de los equipos de perforación, como puede ser el establecimiento de los anclajes, así como también la existencia de gas superficial, fallas y otro tipo de situaciones que puedan ser problemáticas para la perforación. Este levantamiento topográfico se realiza mediante embarcaciones equipadas con sonar, que a la vez pueden también realizar una exploración sísmica somera (profundidades de 0-500 m), sobre todo para detectar gas superficial que es un riesgo importante en la perforación.

Por último, es también necesario el estudio de las condiciones marítimas y meteorológicas predominantes en la localización para posteriormente realizar los estudios necesarios para garantizar la estabilidad de las estructuras y la seguridad de los trabajos de perforación. En este sentido los parámetros fundamentales a estudiar serían las mareas (entre otras cosas para determinar la altura de la plataforma), las corrientes marinas, oleaje y viento (para garantizar la estabilidad estructural de las plataformas y la estabilidad de los barcos perforadores y plataformas semisumergibles, así como el establecimiento de planes de actuación en caso de vertidos).

Perforación

Una vez que la exploración sísmica concluye la posible existencia de un yacimiento, la siguiente fase de la exploración consiste en la perforación para confirmar la presencia de petróleo y/o gas natural. En la fase de exploración se utilizan fundamentalmente tres tipos de instalaciones: plataformas autoelevables (*jack-up rigs*), plataformas semisumergibles (*semi-submersible rigs*) y barcos perforadores (*drill-ships*) [261]. Existe otro tipo de instalaciones denominadas barcazas (*drilling barges*) que se usan en aguas poco profundas, tranquilas e interiores como lagos, ríos y canales, por lo que su uso es fundamentalmente *onshore* [236].

Plataformas autoelevables (*jack-up rigs*)

Las plataformas autoelevables (*jack-up rigs*) son estructuras que en la mayoría de los casos son remolcadas a flote o transportadas hasta la localización del yacimiento y una vez en él se apoyan sobre tres o cuatro patas, normalmente formadas por una estructura de celosía de tubulares metálicos que se bajan hasta que se apoyan sobre el suelo marino, es decir, una vez en el yacimiento estas plataformas no están flotando, sino apoyadas en las patas. Son plataformas utilizadas en aguas poco profundas, en el entorno de 100 m. de profundidad, por lo tanto, en el ámbito de la plataforma continental [236] [261]. Este tipo de plataformas son una estructura estable y sin movimientos bruscos provocados por el mar durante los trabajos de perforación [236].

Plataformas semisumergibles (*semi-submersible rigs*)

Las plataformas semisumergibles (*semi-submersible rigs*) permanecen flotando sobre pontones durante los trabajos de perforación. Estos pontones disponen de tanques de lastre y la altura sobre la superficie del mar se regula bombeando agua del mar dentro o fuera de los tanques. La plataforma se ancla con entre seis y doce cadenas de anclaje y dispone de sistemas de posicionamiento dinámico con propulsores controlados por ordenador. Para el diseño del sistema de anclaje es necesario tener en cuenta la profundidad del agua, mareas, corrientes y vientos existentes en la localización [236]

[261]. Este tipo de instalaciones se utiliza en la perforación de aguas profundas y se trasladan al emplazamiento mediante transporte, remolcadores o también por autopropulsión.

El diseño de estas instalaciones les permite soportar las condiciones meteorológicas adversas (tormentas, huracanes, etc.) que puedan ocurrir de forma puntual, pero también soportan condiciones marítimas adversas que tienen lugar de forma constante en algunos emplazamientos [236].

Barcos perforadores (*drill ships*)

Los barcos perforadores (*drill ships*) son buques adaptados para la perforación en la fase de exploración. A primera vista lo que los diferencian de los demás barcos es que están dotados de una torre de perforación y bajo ella la abertura (*moon pool*) por la que desciende la barrena para la perforación, así como otros equipos y buceadores para tareas de mantenimiento. Al igual que sucede con las plataformas semisumergibles, para mantener la posición del barco se utiliza un conjunto de anclas y sistemas de posicionamiento dinámico. Aún así, debido a la propia forma del barco son menos estables que las plataformas semisumergibles y también son más sensibles a las condiciones atmosféricas y al estado del mar. De las tres instalaciones utilizadas para la perforación en la fase de exploración los barcos perforadores son los más sencillos en su desplazamiento y no se necesitan medios externos para ello. Realizan perforaciones en aguas profundas y son también utilizados en exploraciones científicas [236] [261].

La única forma de confirmar la presencia de petróleo y/o gas natural es realizando una perforación hasta el yacimiento [236]. La perforación se realiza mediante una sarta de perforación (*drill string*), que conecta la barrena con el sistema rotatorio de la plataforma de perforación. Transmite y soporta tanto cargas axiales como de torsión y conduce los lodos de perforación. Los componentes principales son:

- Tubería de perforación (*drill pipe*). Es la que mediante el movimiento rotatorio transmite la potencia a la barrena [262]. También conducen los lodos de perforación. Son tubos huecos y sin costuras de acero (también existen de aluminio extruido) y son muy utilizados los de 30 pies de longitud (9,1 m) [236]. En los extremos disponen de las conexiones (*tool joints*) con el resto de los elementos de la sarta, que deben tener el espesor suficiente para estar roscadas (macho y hembra) [263].
- Lastrabarrenas (*drill collar*). Son tubos de paredes pesadas que proporcionan peso a la barrena y mantienen la tubería en tensión durante la perforación [262] de forma que previenen el pandeo. Están roscadas en los extremos para conectarse con el resto de los elementos de la sarta (macho y hembra en cada lado respectivamente). Pueden ser lisas o en espiral [263].
- Tubería de Perforación Extrapesada (*Heavy Weight Drill Pipe, HWDP*). Constituye la transición entre la tubería de perforación y los lastrabarrenas para evitar cambios bruscos de sección. Aunque son más rígidas que las tuberías de perforación también pueden sufrir pandeo. La experiencia indica que no debe ser usada en compresión en perforaciones verticales y los fabricantes no recomiendan su uso en compresión en ningún caso en hoyos de tamaño superior a 12 ¼" [263].
- Barrena (*drill bit*). Existen dos tipos de barrenas, de conos rotatorios (frecuentemente tres conos) y de diamante. En el caso de las barrenas de conos rotatorios, en cada cono existen varias filas de dientes y cada uno de ellos actúa como un cincel. Diseñada para romper la roca presionándola lo suficiente para

sobrepasar su punto de fractura. En el caso de las barrenas de diamante disponen de diamantes embebidos. Su funcionamiento se basa en el corte del material por lo que se requiere un menor esfuerzo de perforación que en las barrenas de conos rotatorios. No disponen de partes móviles lo que, en este sentido, tienen ventaja sobre las de conos rotatorios al disminuir las averías. En cualquier caso, la elección de uno u otro tipo de barrena depende básicamente de una evaluación económica [236].

- **Otros elementos:** Estabilizadores, que proporcionan distancias fijas desde las paredes del pozo, reducen las vibraciones y reducen el momento de torsión al evitar el contacto de los lastrabarrenas con las paredes del pozo. Escariadores de Rodillo, con la misma función que los estabilizadores, pero utilizados donde pueda haber problemas de torsión. Flecha o Kelly (*Top Drive System*) (no forma parte de la sarta de perforación pero transmite y absorbe torsiones y soporta tensiones de la sarta, transmite la rotación a la sarta, proporciona el acceso del lodo de perforación y soporta el peso de la sarta) [262] [263], Martillos, Tijeras o Percutores, que generan impactos sobre otro componente en caso de atasco.

A la parte inferior de la sarta de perforación se la conoce como herramienta de fondo o arreglo de fondo de pozo (*Bottom Hole Assembly BHA*) que le proporciona fuerza a la barrena para romper la roca y también control direccional [262]. En algunos casos puede incluir un motor de lodo.

Durante la perforación se inyecta en el pozo a través de la sarta de perforación un fluido denominado lodo de perforación (*drilling mud*). El lodo de perforación tiene los siguientes cometidos:

- Sacar del pozo los recortes de roca y escombros generados durante la perforación utilizando el espacio entre la sarta de perforación y las paredes (cubierta o revestimiento) del pozo.
- Lubricación y refrigeración de la barrena. También de la sarta de perforación y las paredes del pozo disminuyendo el rozamiento.
- Rellenado del pozo generando una presión que impida la entrada en el pozo de agua u otros fluidos presentes en formaciones subterráneas. Ayuda a soportar las paredes del pozo de forma que la tubería de revestimiento pueda ser instalada y cementada.

El lodo de perforación más utilizado es una mezcla a base de agua y arcilla (*water-based mud WBM*) a la que se le puede añadir, entre otros componentes, barita (BaSO_4) como agente densificante que regula la presión hidrostática en el pozo, emulsionantes, así como arena, bentonita, polímeros orgánicos y otros sólidos muy finos que generen la viscosidad apropiada del fluido, compuestos para prevenir la corrosión como sulfito de sodio (Na_2SO_3), bisulfato de amonio ($(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$), carbonato de zinc (CO_3Zn) y cal para incrementar la basicidad del fluido de forma que contribuya a la prevención de la corrosión y ayude a estabilizar las emulsiones en los lodos [236].

Existen también otros fluidos de perforación basados en aceite (*oil-based muds OBM*) utilizados cuando por las condiciones de la perforación, los lodos basados en agua no proporcionan la suficiente lubricación. También se utilizan en perforaciones direccionales. Los lodos de base aceite se utilizaron desde principios de siglo pasado utilizando diferentes sustancias, desde crudo al principio, posteriormente emulsiones de petróleo, el diésel a finales de los años 70, y a principios de los 80 aceites minerales [264].

Por último, están los fluidos de perforación sintéticos (SBM), desarrollados a principios de los años 90 del siglo pasado, a base de ésteres, polialfaolefinas, alfaolefinas lineales y olefinas internas [264].

Como se indicaba anteriormente, los lodos de perforación contribuyen a la estabilidad de las paredes del pozo, pero esto no es suficiente para sostenerlas de forma permanente. Por lo tanto, es necesario consolidar dichas paredes mediante la instalación de tuberías de acero (tuberías de revestimiento o encamisado (*casing*)) y el hormigonado en el hueco existente entre la tubería y las paredes (Figura 97). El rellenado del hormigón se realiza introduciéndolo en el pozo a través de la tubería para posteriormente ser empujado por lodos de perforación introducidos a presión, interponiendo separadores entre el lodo y el hormigón. El empuje del lodo sobre el hormigón hace que, al alcanzar el fondo del pozo, el hormigón ascienda por el espacio existente entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo.

A medida que es necesario profundizar más el pozo, se van introduciendo tuberías de menor diámetro repitiendo la operación de hormigonado hasta alcanzar la profundidad necesaria.

La perforación y la salida del petróleo del pozo debe ser realizada de forma controlada. Para ello se utiliza un dispositivo denominado preventor o BOP (*Blowout Preventer*). Este equipo está formado por un conjunto de válvulas para contener la presión del pozo y prevenir reventones que lleven a un derrame de petróleo. En las plataformas flotantes el BOP va instalado en la parte superior de pozo, mientras que en las plataformas fijas se instala bajo la cubierta de la plataforma por encima de la superficie del agua [236].

El BOP es un elemento crítico del montaje de perforación, por lo que debe ser monitorizado y sometido a pruebas periódicas para garantizar su buen funcionamiento. Además, en ocasiones se utilizan varias unidades individuales que se combinan para formar un sistema de preventores de forma que se obtenga un conjunto con la aportación de diferentes funciones o bien para obtener redundancias que garanticen la seguridad de las operaciones. Existen dos tipos fundamentales de preventores: BOP de ariete (*ram preventers*) y BOP anulares (*annular preventers*) que frecuentemente se usan de forma conjunta.

En los preventores de ariete el cierre se consigue mediante el empuje laterales de los elementos de sellado. Existen diferentes tipos: de tubería, que únicamente sella un único tamaño de tubería, de diámetro variable (VBR) que sella en varios tamaños de tuberías, ciegos, que sella pozos abiertos y cortadores, que sella después de cortar las tuberías [265].

Los preventores anulares pueden sellar en varios tamaños de tubería, en un cable de alambre y un pozo abierto. El cierre se obtiene bombeando fluido hidráulico en la cámara de cierre y el sellado se produce con el movimiento vertical u horizontal del elemento circular de goma empaquetador. En general el tiempo necesario para el cierre es mayor que en el caso de un preventor de ariete debido a que necesita más cantidad de fluido hidráulico [265].

La normativa asociada a estos equipos es la ISO 13533 / *API Specification 16A Petroleum and natural gas industries — Drilling and production equipment — Drill-through equipment*, aunque API tiene una publicación específica: *API Std 53 Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells*.

La conexión entre el pozo y la plataforma se realiza mediante un conductor denominado *riser*. A través del riser se introduce la sarta de perforación y se traslada el recurso desde el yacimiento. En el caso de las plataformas flotantes el riser parte del preventor que está instalado sobre el pozo, mientras que en las plataformas fijas el riser parte del pozo y termina en el preventor instalado por debajo de la cubierta de la plataforma.

En el caso de descubrimiento del recurso puede ser necesaria la realización de pozos de evaluación que permita determinar aspectos como la viabilidad económica del yacimiento, así como los posibles niveles de producción. Tanto el pozo de exploración como estos pozos de evaluación pueden ser usados posteriormente como pozos de producción. En este caso se suspenden hasta el momento efectivo de la producción. La suspensión del pozo se realiza tapándolo con hormigón y tapar también la cubierta del orificio superior del pozo, de forma que se permita su reutilización posterior. En caso de que el pozo deba ser cerrado definitivamente se sella con hormigón y la cubierta del pozo se corta por debajo del fondo marino [261].

4.3.4.1. Producción de petróleo y gas natural

Una vez confirmada la presencia de petróleo y/o gas natural comienzan las actividades de extracción. Generalmente se procede a la instalación de una nueva plataforma, en este caso de producción. Existen diferentes tipos de plataformas usadas dependiendo fundamentalmente de la profundidad del agua y de las características de la localización del yacimiento (corrientes, mareas, condiciones meteorológicas predominantes), así como del propio yacimiento (número de pozos, posibilidades de ampliación) y relacionado con todo ello, la eficiencia en los costes.

SCHEMATIC OF A COMPLETED OFFSHORE WELL

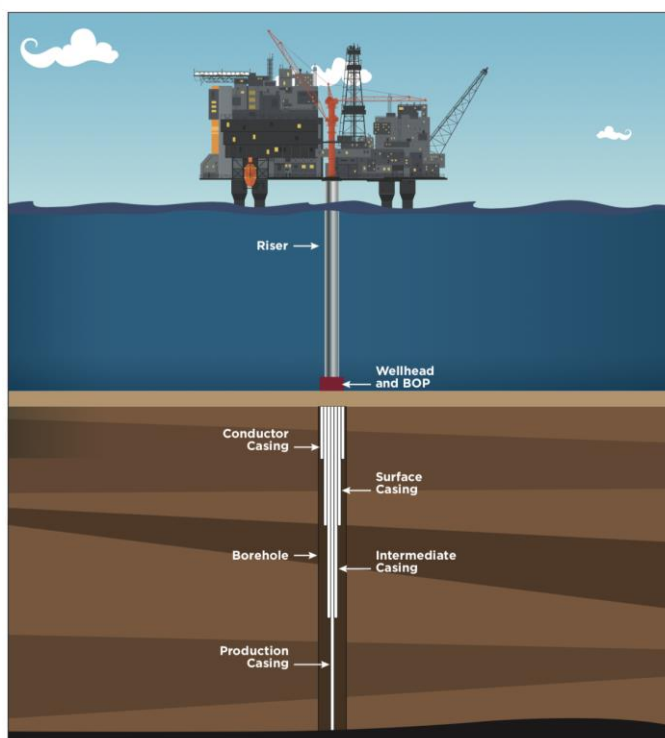


Figura 97: Esquema de una perforación [266]

La mayoría de las plataformas petrolíferas se encuentran en las plataformas continentales, pero la búsqueda de nuevos yacimientos y los avances tecnológicos han propiciado las operaciones en aguas profundas y muy profundas. En este sentido, se entienden como aguas convencionales las que tienen profundidades inferiores a 400 m, aguas profundas (*deepwater*) las aguas con profundidades de 400 a 1.500 m y aguas ultraprofundas (*ultra deepwater*) las aguas con profundidades superiores a 1.500 m. Las plataformas petrolíferas están normalmente situadas lo suficientemente lejos de la costa para que tengan que ser autosuficientes durante largos períodos de tiempo, por lo que deben disponer de sistemas propios de generación de electricidad y suministro de agua, así como alojamientos adecuados para el personal que trabaja en ellas. Existen plataformas fijas, apoyadas sobre el fondo marino mediante diversos sistemas y plataformas flotantes dotadas de sistemas de anclaje. La necesidad de estas últimas se ha visto incrementada con el progresivo aumento de la profundidad que se citaba anteriormente.

Las condiciones de diseño, fabricación, transporte, instalación y desmontaje están normalizadas fundamentalmente por dos normas: API RP 2A-WSD [267] e ISO 19902:2007 [268] y en estas normas se especifica la necesidad de considerar las características meteorológicas y oceanográficas (tanto en condiciones normales como en condiciones extremas): vientos, oleaje, mareas, corrientes, hielos. También establecen la necesidad de tener en cuenta procesos geológicos que tengan lugar en la localización, como movimientos de sedimentos próximos a la superficie del fondo marino, terremotos, presencia de fallas, inestabilidad del fondo marino (debido a cargas sobre el suelo como ondas de presión, el peso propio del suelo, presencia de sedimentos no consolidados, etc...), posibles socavaciones en el fondo marino debido a corrientes, presencia de gas somero y otra posible información ambiental que pueda haber disponibles sobre la localización [267].

Entre las plataformas de producción fijas situadas en zonas poco profundas (pero aún así alcanzando profundidades de hasta un entorno de 500 m) están las plataformas tipo *jacket*, en las que la plataforma se apoya en una estructura de tubulares metálicos en forma de celosía que está anclada en el suelo marino en una cimentación.

Las **Plataformas Fijas Flexibles** (*Compliant Towers*) tienen en común con las Plataformas Fijas Jacket que se soportan sobre una estructura metálica de celosía, pero son de dimensiones inferiores que las de las de tipo Jacket y formadas por secciones que les dan una mayor flexibilidad lo que les permite ser usadas en profundidades superiores, siendo su utilización en profundidades de entre 400 y 900 m aproximadamente [236].

Las plataformas fijas tipo **GSB** (*Gravity Based Structures*), también conocidas como **Condeep** (nombre derivado de *concrete deepwater structure*) se soportan por su propio peso, tanto de sus patas (que son de hormigón armado hasta pocos metros por debajo de la superficie del mar) como una base de tanques de hormigón. Son usadas principalmente en el Mar del Norte y fueron pensadas para condiciones meteorológicas adversas y tienen la ventaja de que en los tanques de hormigón se puede almacenar petróleo y gas natural y además hay equipamientos que quedan protegidos del mar al ir instalados en el interior hueco de las patas. Este tipo de plataformas tiene un coste bastante elevado y en este momento no se fabrican [236].

Aunque las plataformas flotantes se han venido utilizando en todo tipo de profundidades, su posterior desarrollo ha sido consecuencia de la necesidad de actuaciones en profundidades cada vez mayores que hacían técnicamente imposible o económicamente inviable las plataformas de tipo fijo. Para el diseño y construcción de este tipo de instalaciones las normas de referencia son API RP 2FPS [269] y la ISO

19904-1:2006 [270]. Aunque las plataformas de tipo fijo pueden disponer de sistemas de anclaje o amarre al fondo marino, esta es una de las características específicas de las plataformas flotantes.

Una plataforma **TLP** (*Tension Leg Platform*) constructivamente es similar a las plataformas semisumergibles descritas en las plataformas de exploración, con una cubierta soportada columnas huecas conectadas mediante pontones. La plataforma se ancla al fondo marino mediante tensores, que le permiten movimientos horizontales, pero no verticales, lo que limita su uso a aguas relativamente tranquilas. Admite un amplio rango de profundidades de entre 500 y 2.000 m aproximadamente [236].

En la **plataforma SPAR** la flotabilidad y estabilidad de la cubierta se consigue con un gran cilindro metálico que está anclado al fondo marino, pero sin el grado de tensión de las plataformas TLP. Su uso permite alcanzar las mayores profundidades de agua, entre 600 y 3000 m aproximadamente [236].

Además de las instalaciones flotantes descritas, también se utilizan barcos similares a los descritos en la exploración constituyendo sistemas FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading systems*) en localizaciones que económicamente hacen difícil la construcción de una plataforma o bien que no disponen de infraestructura para el transporte de la producción.

Para la extracción del recurso se realiza la perforación de los pozos según lo descrito durante la exploración. Tanto el pozo de exploración mediante el que se localizó el recurso como los pozos de evaluación realizados para su caracterización, y que fueron suspendidos una vez concluido el programa de perforaciones exploratorias, pueden ser usados de nuevo para la extracción, suponiendo un ahorro de costes importante.

Inicialmente la propia presión del yacimiento permite directamente la extracción del recurso, pero solo hasta una cantidad que estaría entre el 5 y el 30% del petróleo existente. Es lo que se conoce como producción primaria. Para la extracción total del recurso son necesarios dos niveles más de extracción. La producción secundaria incrementa la presión del pozo mediante la inyección de agua presurizada (incluso en algunos casos introducción gas natural en zonas donde este es muy abundante). Mediante la producción secundaria se alcanzaría hasta un 45% del recurso. A partir de determinado momento la diferencia de densidades entre el petróleo y el agua no es suficiente para impedir que el agua inyectada se introduzca en el pozo de extracción, por lo que es necesario incrementar esta diferencia de densidades mediante tecnologías adicional denominadas técnicas mejoradas de recuperación de petróleo (*EOR, Enhanced Oil Recover technologies*), que suponen el nivel de producción terciaria. Estas pueden consistir en la introducción de agua caliente o disolventes que disminuyan la viscosidad del petróleo o bien la introducción de polímeros líquidos entre el agua y el petróleo que impidan que el agua circule a través de petróleo hacia el pozo. Con la producción terciaria se alcanzaría la recuperación de hasta un 60% del recurso presente en el yacimiento, es decir, un 40% del recurso no puede ser extraído. En el caso del gas natural, para la extracción del recurso que no se extrae directamente mediante la producción primaria, se utilizan bombas de succión [271].

La extracción del recurso se realiza a través de una infraestructura submarina compuesta por diversos elementos como árboles submarinos (*subsea trees*), colectores (*manifolds*), líneas umbilicales (*umbilicals*), tuberías de interconexión (*jumpers*), tuberías de elevación (*risers*) así como componentes del sistema hidráulico y del sistema eléctrico y de automatización.

Al comienzo de la perforación se instala el cabezal de pozo (*wellhead*) que proporciona el soporte estructural para los elementos que será necesario instalar para la extracción segura y controlada del recurso.

La extracción del recurso se realiza a través de un dispositivo denominado árbol (*subsea tree*), que consiste en una configuración compleja de válvulas y otros componentes cuya función es monitorizar y controlar el flujo del recurso producido, así como la inyección de gas u otros fluidos para la producción secundaria o terciaria, así como permitir intervenir en caso necesario. El manejo remoto del árbol se realiza a través de un módulo de control submarino (*SCM, Subsea Control Module*) que contiene los dispositivos eléctricos e hidráulicos para la operación del árbol [272]. Los componentes del árbol están dispuestos en una estructura de acero que se instala sobre el cabezal del pozo (*wellhead*).

Los diferentes pozos del yacimiento se conectan a un colector de producción (*manifold*) a través de tuberías de interconexión (*jumpers*) que recogen el recurso de los diferentes pozos o, en el caso de los colectores de inyección distribuyen el agua, gas o polímeros y para las diferentes fases de la producción. En caso necesario puede ser instaladas también bombas submarinas.

Los equipos de la infraestructura submarina son controlados desde la plataforma. La energía, los fluidos del sistema hidráulico y los cables de control se alojan en un dispositivo denominado tubo umbilical (*umbilical*) que agrupa a todos o varios de los conductores de estos sistemas.

En las operaciones de producción el trasvase de fluidos entre la plataforma y el sistema submarino se realiza a través de una tubería denominada *riser*. Los *riser* conducen tanto la producción desde el sistema submarino hacia la plataforma como fluidos inyectados desde la plataforma hacia el pozo. Los *risers* tensionados desde superficie (*top tensioned risers*) son tuberías completamente verticales. Tienen el movimiento lateral muy limitado por lo que su uso no está indicado en la mayoría de los sistemas flotantes con la excepción de las plataformas tipo SPAR por su mayor estabilidad. El resto de tipología de *riser* están completamente sumergidos (*wet tree riser systems*). Los *risers* catenarios de acero (*steel catenary risers*) están dispuestos describiendo una catenaria lo que les permite una flexibilidad mayor que a los de tipo tensionado lo que los hace adecuados para cualquier tipo de plataforma o barco. En cualquier caso, los movimientos deben estar limitados porque de forma excesiva podría causar daños en las instalaciones. Otro tipo de *riser* con capacidad de movimiento son los *riser* flexibles. Estos están compuestos de diferentes capas de materiales de forma que, a partir de una tubería de acero interior, se suceden capas que proporcionan resistencia mecánica (tanto a la presión como a la tensión), aislamiento y protección. Este tipo de *riser* se ha venido utilizando más a medida que se ha incrementado la profundidad de la explotación. Esta flexibilidad permite su instalación en diferentes configuraciones. Su instalación requiere también de accesorios que regulen su flotabilidad y direccionamiento. Los *risers* híbridos (*hybrid risers*) combinan las tecnologías de acero y flexibles de forma que estas últimas absorban la mayor parte de los movimientos. Un caso particular de los *risers* híbridos es el FSFR (*Free Standing Flexible Riser*) que consta de una parte vertical desde el fondo marino hasta una boya y una parte flexible desde la boya hasta la plataforma. Esta configuración puede ser sencilla (con una sola línea) o con varias líneas [273].

Las operaciones en las infraestructuras submarinas son realizadas en las zonas de gran profundidad por robots manejados a distancia denominados ROVs (*Remote Operated Vehicles*). Estos equipos son especialmente importantes a grandes

profundidades donde el trabajo de los buzos no es posible, e intervienen e prácticamente todas las fases de operación de la explotación: durante la perforación monitorizan los preventores y el riser, como apoyo durante diversas operaciones de construcción, durante las operaciones de mantenimiento realizando tareas de inspección y reparación y finalmente durante el abandono del pozo como ayuda en la monitorización de los trabajos.

Una vez que el yacimiento cesa su producción el siguiente paso sería su desmantelamiento (*decommissioning*). El desmantelamiento es una operación de coste elevado, por lo que en ocasiones se realizan desmantelamientos parciales en los casos en los que la regulación lo permita. Basándose en dicha regulación la decisión del alcance del desmantelamiento dependerá de factores ambientales, de seguridad de las operaciones de desmontaje y del coste. Las posibles opciones de desmantelamiento de menor a mayor coste para una determinada instalación son: abandono en el lugar, retirada parcial, derribo en el propio lugar y la retirada completa de los equipos. En este sentido se alegan cuestiones ambientales indicando que buena parte de los equipos podrían formar arrecifes para la vida marina. Para iniciar el proceso de desmantelamiento en primer lugar los operadores deben disponer de las autorizaciones administrativas necesarias. A continuación, todos los equipos y zonas con materiales peligrosos deben ser limpiados y purgados para prevenir la liberación de hidrocarburos. El pozo debe ser limpiado y taponado, realizando pruebas de presión. Una vez desmantelados y retirados los equipos se realizan inspecciones que localicen posibles escombros que puedan haber quedado. Finalmente se pasa una red de arrastre para la limpieza final. El desmantelamiento implica el uso de diferentes técnicas de corte: uso de abrasivos (inyección de materiales como arena con agua a presión), explosivos, sierras de diamante (pueden cortar simultáneamente acero y hormigón) y uso de dispositivos de corte interno de tuberías [274].

4.3.4.2. Impactos ambientales de la exploración, extracción y transporte del petróleo y del gas natural

Exploración sísmica

Independientemente de los impactos ambientales comunes a una actividad marítima (emisiones de combustibles, residuos, impactos derivados de accidentes del barco o de alguno de los equipos utilizados), los impactos específicos asociados a la exploración sísmica son los derivados de la introducción de ondas sonoras en el medio ambiente marino de forma que estas afectan a la vida marina: mamíferos, cefalópodos, peces y zooplancton.

El medio ambiente marino es de forma natural ruidoso. Existen fuentes naturales de sonido, debidos a fenómenos naturales (como impactos de rayos o movimientos sísmicos más o menos intensos) y debido también a la vida animal y al propio ambiente marino. La exploración sísmica incorpora sonidos adicionales, con intensidad y presión de sonido de hasta 255 dB y 1 μ Pa a 1 m [275].

Con el fin de proteger los posibles daños en la vida marina, durante las operaciones se adoptan las precauciones necesarias para evitar, en lo posible, daños a la vida marina. Dichas medidas empiezan con el análisis del movimiento de animales marinos en la zona, así como de las pautas de comportamiento de dichos animales. En todo caso en el momento de comenzar las operaciones se disponen de medios de monitorización acústica y visual para detectar la presencia sobre todo de mamíferos marinos. Para proporcionar a los animales marinos el tiempo suficiente para que abandonen la zona de estudio, el proceso comienza con ondas suaves para ir progresivamente aumentando hasta alcanzar

los niveles operativos del procedimiento. En lo que respecta a los cetáceos han sido identificados una serie de posibles efectos derivados de las actividades de adquisición sísmica (Tabla 47).

Tabla 47: Impactos sobre los cetáceos de los procesos de adquisición sísmica
Adaptado de [276]

Efectos	Consecuencias
Físicos	Daño a tejidos corporales.
	Graves daños a los conductos auditivos.
	Cambios en el umbral de sensibilidad auditiva (permanente o temporal).
	Efectos de stress crónico.
De percepción	Enmascaramiento de sonidos biológicamente relevantes: Señales de comunicación, ecolocalización, sonidos asociados con la orientación, localización de presas o para evitar amenazas naturales o generadas por las actividades humanas.
De comportamiento	Alteración en los comportamientos de alimentación, alejamiento de determinadas áreas, alteración de las pautas de respiración e inmersión y alteración de las pautas de apareamiento.
Indirectos	Disminución de la disponibilidad de las presas con la consiguiente reducción de las tasas de alimentación.

Dado que la intensidad el ruido disminuye con la distancia desde la fuente, para los valores de la intensidad de sonido utilizados en la adquisición sísmica de (220 a 260 dB), los diferentes efectos dependerán de la posición de los animales respecto a la fuente. El hecho de que la amplitud y la frecuencia de las ondas sonoras estén en el rango de valores biológicamente relevantes para los cetáceos (ecolocalización y comunicación) es, en principio, un impacto negativo sobre la percepción de estos animales en el sentido de que puede enmascarar estas señales [276]. Sin embargo, esta coincidencia puede ser utilizada como medio de mitigación de los impactos, ya que los hidrófonos pueden también detectar estas señales procedentes de los mamíferos marinos, por lo que se han desarrollado equipos que permiten la detección, en el entorno de la prospección, de estos animales [259]. Otro método de mitigación es el desarrollo de cañones de aire comprimido con ondas con reducido componente de alta frecuencia, que es la que más afecta a los animales marinos [259]. Además de la presencia en las instalaciones de observadores expertos, en la Tabla 48 se indican diferentes métodos de detección de mamíferos marinos con diferentes resultados en función de diferentes situaciones, por lo que puede ser necesario la combinación de varios de ellos [277]:

Tabla 48: Métodos de detección de mamíferos marinos en trabajos de adquisición sísmica
Adaptada de [277]

Método	Funcionamiento
PAM (<i>Passive Acoustic Monitoring</i>)	Detección de los mamíferos marinos por los sonidos que emiten.
AAM (<i>Active Acoustic Monitoring</i>)	El cuerpo de los mamíferos marinos y, por extensión, la perturbación que causan en agua refleja las ondas sonoras emitidas por un sistema AAM.
Radiación Térmica (<i>Thermal IR</i>)	Detección de las partes calientes del cuerpo de los mamíferos o de su exhalación.
Radar	Uso de ondas electromagnéticas para la detección de objetos que las reflejan.

Perforación, explotación y transporte de petróleo y gas natural

Las operaciones asociadas a los trabajos de perforación descritos anteriormente, ya sea en fase exploratoria o en fase de producción tienen asociados unos impactos sobre el medio que es necesario identificar y mitigar (Tabla 49). En lo que respecta a los residuos generados hablaríamos de [236]:

- Agua producida (*produced water*), entendiendo como tal la extraída junto con el petróleo y el gas debido a la presencia de agua una o varias capas del yacimiento. Esta agua contiene una variedad de hidrocarburos aromáticos.
- Aguas de lastre (*ballast water*) utilizadas para mantener la estabilidad en el caso de los barcos o regular la parte sumergida de las plataformas semisumergibles. Las aguas de lastre son una importante fuente de traslado de organismos a ecosistemas que les son extraños generando especies invasoras. A tal efecto la Organización Marítima Internacional ha desarrollado el Convenio internacional para el control y la gestión del agua de lastre y los sedimentos de los buques. Este convenio adoptado el 13 de febrero de 2004 y tiene fecha de entrada en vigor el 8 de septiembre de 2017 contiene prescripciones para el tratamiento de las aguas de lastre en los buques.
- Drenaje de cubiertas y tanques (*deck drainage*).
- Lodos de perforación (*drilling muds*). No solo los tradicionales basados en agua, sino también los lodos de perforación basados en aceite (*oil-based muds – OBM*) utilizados cuando los basados en agua no proporcionan la suficiente lubricación y también usados en perforaciones direccionales, que además requieren una mayor cantidad de lodos y los lodos sintéticos (SBM) utilizados en operaciones críticas de alto coste y riesgo [264]. Desde un punto de vista ambiental los lodos más preocupantes son los basados en aceite, lo que generó legislación en varios países para restringir el uso de estos lodos [264].
- Escombros de perforación (*drill cuttings*).
- Arena producida (*produced sand*).
- Residuos de cementado (*cement residue*).
- Fluidos del BOP (*Blow Out Preventer*).
- Residuos domésticos y sanitarios.
- Residuos del procesamiento del petróleo y el gas.
- Petróleo decantado.
- Agua de refrigeración.

Los contaminantes asociados a estos residuos se producen durante diferentes operaciones de las actividades de perforación y explotación del yacimiento, generando acciones sobre el medio ambiente como descargas o emisiones al medio marino, emisiones atmosféricas, residuos trasladados a tierra, accidentes y otro tipo de efectos. Pueden ocurrir debido a la propia naturaleza de dichas actividades o bien por accidentes durante alguna fase de las operaciones ya sea de la propia plataforma o barco, como de cualquier otra instalación o vehículo de apoyo.

Tabla 49: Acciones sobre el medio ambiente y sus fuentes de las operaciones de perforación y explotación del yacimiento *offshore*
Elaboración propia a partir de [261]

ACCIONES SOBRE EL MEDIO AMBIENTE	FUENTES
Descargas o emisiones al medio marino.	Sedimentos de la perforación
	Agua de refrigeración
	Agua de lastre
	Disolución de la protección contra la corrosión y contra la incrustación
	Resultado de drenaje de cubiertas y limpieza de tanques
	Residuos derivados del saneamiento y de productos alimenticios
	Lodos y escombros
	Salmueras procedentes de equipos de desalinización
	Retorno de hormigón del proceso de cementación
	Otros productos químicos del proceso de perforación
Emisiones atmosféricas	Gases de combustión de los equipos de generación eléctrica
	Emisiones procedentes de fugas del almacenamiento de fuel y de productos químicos
	Emisiones de los equipos de ventilación
	Emisiones de combustión de la antorcha
Residuos trasladados a tierra	Residuos sólidos
	Residuos líquidos y de lavados de tanques
	Lodos y escombros
Accidentes	Vertidos de petróleo
	Vertidos de productos químicos
	Liberación de gas
	Caída de objetos al mar
	Colisiones
Otro tipo de efectos	Presencia física de las plataformas y buques u otros medios de soporte
	Sonido de helicópteros de traslados de personal y equipos
	Ruido submarino
	Presencia de luz
	Alteraciones del fondo marino por la instalación de los soportes de las patas de las plataformas (<i>spud cans</i>)

Además de los efectos derivados de las actividades normales, los mayores impactos ambientales son los derivados de los accidentes durante las actividades de exploración, explotación y transporte del petróleo. Aunque el principal conocimiento social sobre este asunto es el derivado de accidentes que por su dimensión e impactos como el caso de la plataforma de exploración *Deepwater Horizon* de BP en 2010 en el Golfo de México, aunque de menor entidad que la anterior, pero en nuestro caso con un gran impacto social el caso del petrolero *Prestige* frente a la costa de Galicia en 2002 o los ya más lejanos en el tiempo de los petroleros Mar Egeo en 1992 y el Urquiola en 1976, la realidad es que en las actividades normales, con incidentes menores, todos los años entre el 0,1 y el 0,2% de la producción mundial de petróleo se vierte al mar [38]. Teniendo en cuenta que la producción mundial de petróleo en 2018 fue de 4.473,3 toneladas [278], estos pequeños porcentajes suponen una cantidad de crudo muy importante vertido al mar.

Los graves problemas derivados de los vertidos de petróleo han llevado a la industria a establecer mejoras tecnológicas y de procedimientos para minimizar el número y el alcance de estos incidentes. En lo que respecta al transporte de petróleo por buques, aunque en la actualidad el número de vertidos se ha visto reducido, la situación en los años 70 era muy grave, con una media de 78,8 vertidos mayores de 7 toneladas al año, de los cuales 24,5 eran superiores a 700 toneladas (Figura 98) [279]. En esta década se produjeron incidentes como los de los petroleros *Atlantic Empress*, en 1979, con un

vertido de 287.000 toneladas, el Amoco Cadiz, en 1978, con 223.000 toneladas, el Sea Star, en 1972, con 115.000 toneladas, o el ya citado Urquiola con 100.000 toneladas. Aunque en las décadas siguientes el número medio de accidentes fue disminuyendo significativamente, siguieron sucediendo eventos importantes como el ABT Summer, en 1991, con 260.000 toneladas, el Castillo de Belver, en 1983 con 252.000 toneladas, o el más reciente de estas dimensiones en 2018, el Sanchi, frente Shangai con 113.000 toneladas [279]. Además de accidentes industriales, los conflictos bélicos en el golfo pérsico han supuesto una fuente importante de vertidos, siendo la retirada de las tropas irakíes de Kuwait el mayor vertido de petróleo de la historia. Se estima que en 1991 se vertieron al mar 10,8 millones de barriles [280], lo que suponen 1.512.000 toneladas de petróleo [281].

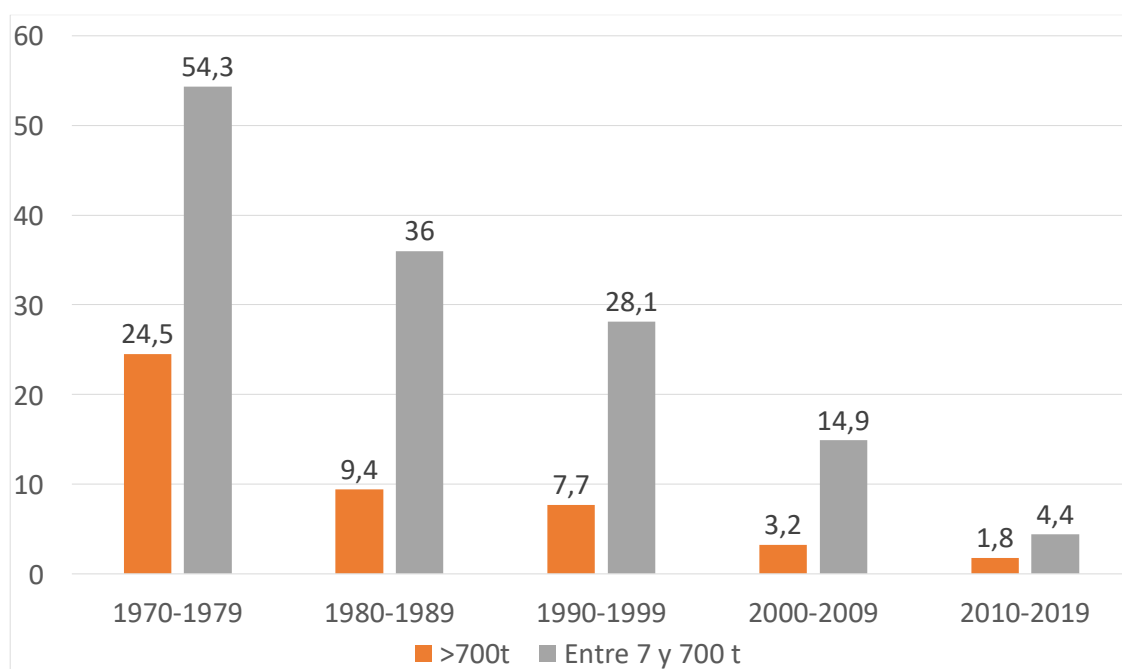
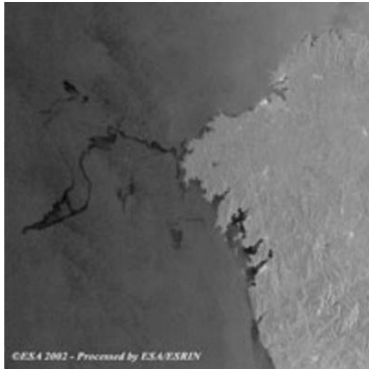


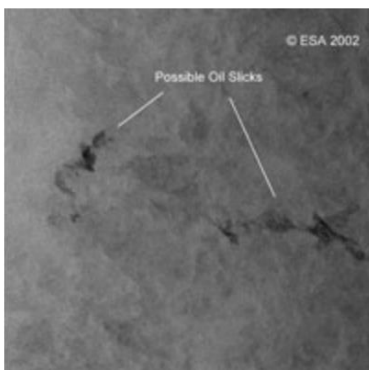
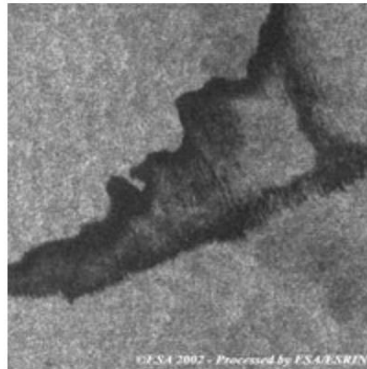
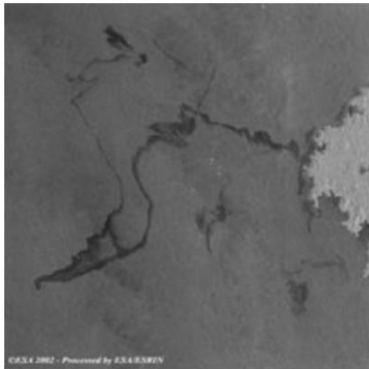
Figura 98: Número de medio anual de vertidos de petroleros por década
Elaboración propia a partir de [279]

Los efectos de los vertidos de petróleo son gravísimos. Además del evidente daño inmediato sobre la biota y los ecosistemas de la zona afectada, se han descrito efectos sobre la salud humana. En un estudio realizado durante el vertido de la plataforma *Deepwater Horizon* se comprobaron concentraciones de benceno de entre 2 y 19 veces mayores a las condiciones anteriores y materia particulada fina PM2.5 en valores superiores a entre 10 y 45 veces a la situación previa [282]. También se han realizado estudios que vinculan los vertidos con el aumento de la mortalidad infantil en Nigeria [283]. De forma más evidente, otros efectos sobre las actividades humanas son las pérdidas económicas en las actividades del entorno (pesca, marisqueo, acuicultura, etc.), posibles daños sobre acuíferos y daños en los entornos costeros que conllevan pérdidas en sectores como el turístico.

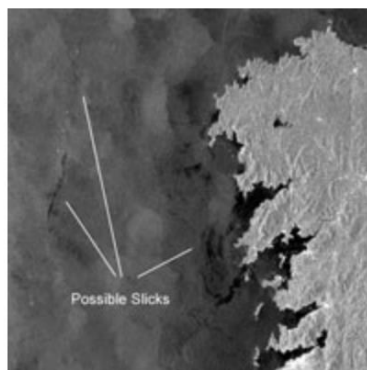


An Envisat ASAR Wide Swath image acquisition was scheduled (in emergency) for 17 November 2002. The data were acquired in Matera (Italy) and the corresponding image was generated on 20 November at ESRIN in Italy. The image covers an area of 400x300 KM.

The two images below show magnified views of this image. The oil slick released by the tanker is visible as a black streak across the images. The tanker itself is visible as a white dot at the bottom-left of the main slick (bottom-left of the image). The black areas along the Spanish coast near the town of Vigo are due to calm waters and not to oil.



ERS SAR acquisition of 2 December at night-time (orbit 39836). Possible oil slicks are visible in the image. The image is located west of Galicia where the ship sank.



Envisat ASAR acquisition of 2 December (orbit 3963). Possible oil slicks are visible in the image. A [magnified view](#) is available that examines one potential oil slick.

Imagen: ESA

Figura 99: Accidente *Prestige* (2002) - Imágenes de satélite [284]

Estas acciones sobre el medio marino pueden causar diferentes efectos sobre la vida marina debido a la composición de los contaminantes asociados a las fuentes de contaminación citadas. Estos efectos incluyen daños físicos a los organismos vivos, efectos tóxicos que afectan tanto directamente a los animales marinos como

indirectamente a través de su alimentación y efectos mutagénicos que provocan cáncer en los animales marinos [236]. Estas afectaciones a la vida marina no se limitan a la localización del yacimiento. La presencia de corrientes marinas, fenómenos meteorológicos como tormentas, huracanes, etc. y la introducción en la cadena trófica de los contaminantes llevan más allá del ámbito local del yacimiento los efectos de dichos contaminantes.

Además de a la vida estrictamente marina las aves pueden verse también afectadas por las actividades asociadas a la exploración y producción de petróleo y gas natural ya que estas pueden verse afectadas durante la migración por las luces de estructuras marinas como plataformas, pudiendo cometer errores en la trayectoria de la migración (Tabla 50). También pueden producirse colisiones de las aves con las estructuras debido al efecto de atracción de las luces y las antorchas de gas de las plataformas petrolíferas. En este último caso se pueden dar incidentes de incineración de aves [259]. Como medidas mitigadoras del efecto de atracción de las luces sobre las aves se han adoptado cambios en su color. En este sentido, las aves migratorias reaccionan fuertemente a las longitudes de onda larga (luz blanca y roja), reaccionan menos a las longitudes de onda más cortas (luz verde) y prácticamente no hay reacción observable en las longitudes de onda cortas (luz azul). Los estudios realizados en plataformas petrolíferas sustituyendo lámparas por otras con bajo contenido en rojos y verdes (el contenido en luz azul no permite el desarrollo de trabajos en condiciones seguras) han dado como resultados preliminares una reducción importante en el número de aves atraídas a la plataforma [285].

Tabla 50: Efectos sobre las aves de las instalaciones *offshore*
Adaptado de [286]

Efectos	Consecuencias
Directos	Colisión con las estructuras de las instalaciones <i>offshore</i>
	Incineración por proximidad a las antorchas de gas
	Agotamiento y hambre derivado de las modificaciones en la trayectoria de las migraciones
	Las instalaciones pueden ser elementos de posado y descanso para las aves
	Desplazamiento de los hábitats
Indirectos	Se produce un suministro de alimento debido a que las plataformas petrolíferas pueden actuar como arrecifes artificiales que atraen a peces e invertebrados
	Alteración de hábitats
	Cambios en el número de depredadores o competidores
	Cambios en la calidad del agua que afecten a la posibilidad de encontrar alimento
	Mayor demanda energética para las especies que aprenden a evitar las instalaciones

4.3.5. Recursos minerales marinos

4.3.5.1. Nódulos polimetálicos

Los nódulos polimetálicos son objetos rocosos creados por agregación sobre un núcleo, que puede ser una concha, otra roca o bien restos de otros nódulos previamente fragmentados, de diversos minerales creando capas concéntricas. Su formación se debe fundamentalmente a dos procesos diferentes (o frecuentemente a una combinación de ellos): dentro de la columna de agua mediante precipitación hidrogénica (los compuestos metálicos existentes en el agua precipitan, siendo en este caso el mineral de manganeso presente sobre todo la vernadita y también estarán presentes compuestos de otros metales), o bien dentro los sedimentos en procesos diagénicos (en esta caso entre los

minerales de manganeso presentes estarían la todorokita y la birnesita) [271] [287]. Su crecimiento es extremadamente lento con tasas de 10 mm por millón de años en el caso de los nódulos hidrogénicos y de entre 10 y 100 mm por millón de años en el caso de los nódulos diagénicos [271].

La composición es muy variable, pero tienen en común que tienen un alto contenido en manganeso, en torno a un 30%. Los casos de interés económico contienen proporciones significativas de níquel, cobre y cobalto. También despiertan interés aquellos con concentraciones también significativas, aunque menores de titanio, molibdeno, litio y neodimio [288].

En la actualidad existen 17 contratos de exploración para nódulos polimetálicos, fundamentalmente en una zona del Pacífico Nororiental denominada Zona de Fractura *Clarion-Clipperton*, excepto en uno de los casos que se localiza en el Índico Central. Estos contratos de exploración, patrocinados por uno o varios estados, tienen una vigencia de 15 años, alguno de ellos ya finalizado con prórrogas de cinco años adicionales (Tabla 51) [289].

Tabla 51: Contratos de exploración para nódulos polimetálicos.
Fuente: *International Seabed Authority* (2018) [289]

CONTRATISTA	Inicio Contrato	Fin Contrato	Inicio Prórroga	Fin Prórroga	ESTADO PATROCINADOR	LOCALIZACIÓN
China Minemetals Corporation	2017	2032			China	Clarion Clipperton Fracture Zone
Cook Islands Investment Corporation	2016	2031			Islas Cook	Clarion Clipperton Fracture Zone
UK Seabed Resources Ltd.	2016	2031			Reino Unido	Clarion-Clipperton Fracture Zone (II)
Ocean Mineral Singapore Pte Ltd.	2015	2030			Singapur	Clarion-Clipperton Fracture Zone
UK Seabed Resources Ltd.	2013	2028			Reino Unido	Clarion-Clipperton Fracture Zone (I)
Global Sea Mineral Resources NV	2013	2028			Bélgica	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Marawa Research and Exploration Ltd.	2015	2030			Kiribati	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Tonga Offshore Mining Limited	2012	2027			Tonga	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Nauru Ocean Resources Inc.	2011	2026			Nauru	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources of Germany	2006	2021			Alemania	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Government of India	2002	2017	2017	2022	India	Indian Ocean
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	2001	2016	2016	2021	Francia	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Deep Ocean Resources Development Co. Ltd.	2001	2016	2016	2021	Japón	Clarion-Clipperton Fracture Zone
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	2001	2016	2016	2021	China	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Government of the Republic of Korea	2001	2016	2016	2021	Corea del Sur	Clarion-Clipperton Fracture Zone

CONTRATISTA	Inicio Contrato	Fin Contrato	Inicio Prórroga	Fin Prórroga	ESTADO PATROCINADOR	LOCALIZACIÓN
JSC Yuzhmorgeologiya	2001	2016	2016	2021	Rusia	Clarion-Clipperton Fracture Zone
Interoceanmetal Joint Organization	2001	2016	2016	2021	Bulgaria Cuba República Checa Polonia Rusia Eslovaquia	Clarion-Clipperton Fracture Zone

4.3.5.2. Sulfuros polimetálicos.

El agua del mar se filtra en el subsuelo de zonas volcánicas y en los límites de las placas tectónicas a través de grietas y roca volcánica. El fluido se calienta con el magma y circula por el subsuelo disolviendo metales y otros elementos. La convección transporta el líquido caliente (400-450 °C) a la superficie creando chimeneas hidrotermales y, al reaccionar con el agua fría del mar, los sulfuros metálicos precipitan sobre las chimeneas y sobre el lecho marino próximo creando depósitos.

La presencia de metales varía en función de la zona en función de la composición del subsuelo marino, pudiendo presentar metales básicos como zinc, plomo, cobre y estaño y metales preciosos y especiales en menor concentración como oro, plata, bismuto, selenio, telurio, galio o indio [290].

Al igual que sucede con los nódulos polimetálicos, existen contratos de exploración para gobiernos o empresas patrocinadas por gobiernos. En este caso los contratos vigentes en la zona son siete (Tabla 52) [289].

Actualmente existen exploraciones comerciales, pero se encuentran dentro de aguas territoriales, en este caso de Papúa Nueva Guinea, por parte de la empresa Nautilus Minerals Inc.

Tabla 52: Contratos de exploración para sulfuros polimetálicos
Fuente: *International Seabed Authority* (2018) [289]

CONTRATISTA	Inicio contrato	Fin contrato	Inicio prórroga	Fin prórroga	ESTADO PATROCINADOR	LOCALIZACIÓN
Government of the Republic of Poland	2018	2033			Polonia	Mid Atlantic Ridge
The Government of India	2016	2031			India	Central Indian Ocean
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources of Germany	2015	2030			Alemania	Central Indian Ocean
Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	2014	2029			Francia	Mid-Atlantic Ridge
Government of the Republic of Korea	2014	2029			Corea del Sur	Central Indian Ridge

CONTRATISTA	Inicio contrato	Fin contrato	Inicio prórroga	Fin prórroga	ESTADO PATROCINADOR	LOCALIZACIÓN
Government of the Russian Federation	2012	2027			Rusia	Mid-Atlantic Ridge
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	2011	2026			China	Southwest Indian Ridge

4.3.5.3. Cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto

Se forman por la precipitación de minerales sobre la superficie de la roca, fundamentalmente vernadita (MnO_2) y oxihidróxido de hierro ($FeO(OH)$), por lo que no se forman donde los sedimentos la cubren. Tienen espesores de hasta 25 cm y cubren áreas de muchos km² (se estima que el 1,7% del fondo oceánico). Las cortezas con mayor espesor y más ricas en cobalto están en el entorno de las cumbres de los montes marinos en profundidades de entre 800 a 2.500 m. El contenido de cobalto (hasta el 1% y en casos hasta el 1,7%) es mucho más alto que en los minerales terrestres (0,1% a 0,2%), aunque se prevé que los costes de explotación serán mayores. Son una potencial fuente importante de titanio, cerio, níquel, manganeso, fósforo, talio, telurio, circonio, tungsteno, bismuto y molibdeno [291].

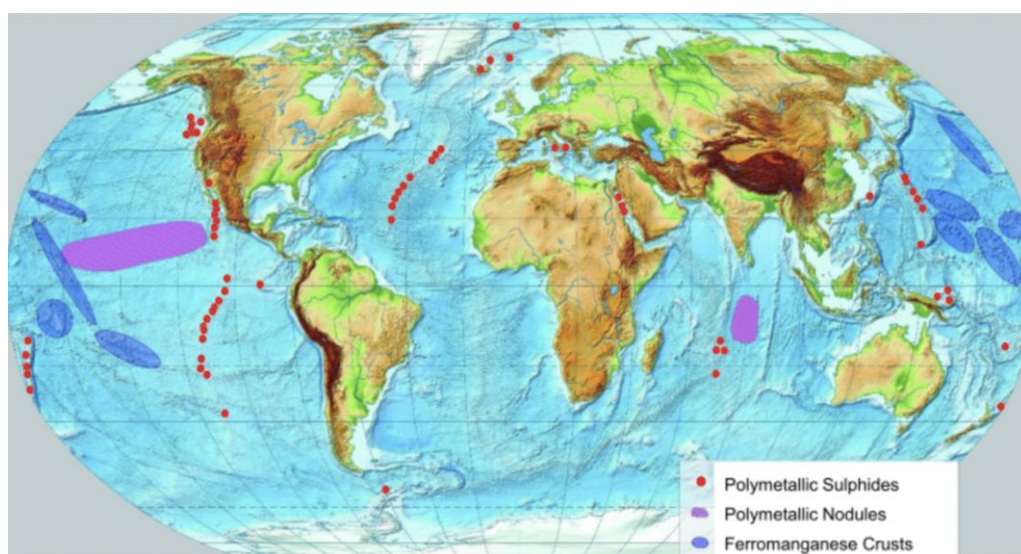
En este caso existen cinco contratos de exploración en vigor (Tabla 53).

Tabla 53: Contratos de exploración para cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto
Fuente: *International Seabed Authority* (2018) [289]

CONTRATISTA	Inicio contrato	Fin contrato	Inicio prórroga	Fin prórroga	ESTADO PATROCINADOR	LOCALIZACIÓN
The Republic of Korea	2018	2033			Corea del Sur	Western Pacific Ocean
Companhia De Pesquisa de Recursos Minerais	2015	2030			Brasil	Rio Grande Rise, South Atlantic Ocean
Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation	2015	2030			Rusia	Magellan Mountains, Pacific Ocean
Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)	2014	2029			Japón	Western Pacific Ocean
China Ocean Mineral Resources Research and Development Association	2014	2029			China	Western Pacific Ocean

4.3.5.4. Distribución de los recursos minerales marinos

Los recursos minerales descritos situados en la Zona (fondo marino de las aguas internacionales) están todavía en fase de prospección. En el caso de los nódulos polimetálicos, la principal zona de prospección se encuentra en el Pacífico Norte, en la Zona de Fractura Clarion-Clipperton. También se han identificado zonas en el Índico y en la cuenca de Perú. Los sulfuros polimetálicos se han localizado en su mayoría en medio del océano en la elevación del Pacífico oriental, la elevación del Pacífico sudeste y la elevación del Pacífico nororiental. Posteriormente se localizaron nuevas ubicaciones en el pacífico occidental a lo largo de la línea de costa en zonas con actividad volcánica o tectónica. Las cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto se encuentran muy distribuidas por el lecho marino de todo el planeta en las cumbres de montañas submarinas. Los depósitos más ricos se han encontrado en el Pacífico, pero la exploración ha sido limitada (Figura 100).



© BGR

Figura 100: Distribución de los recursos minerales marinos [292]

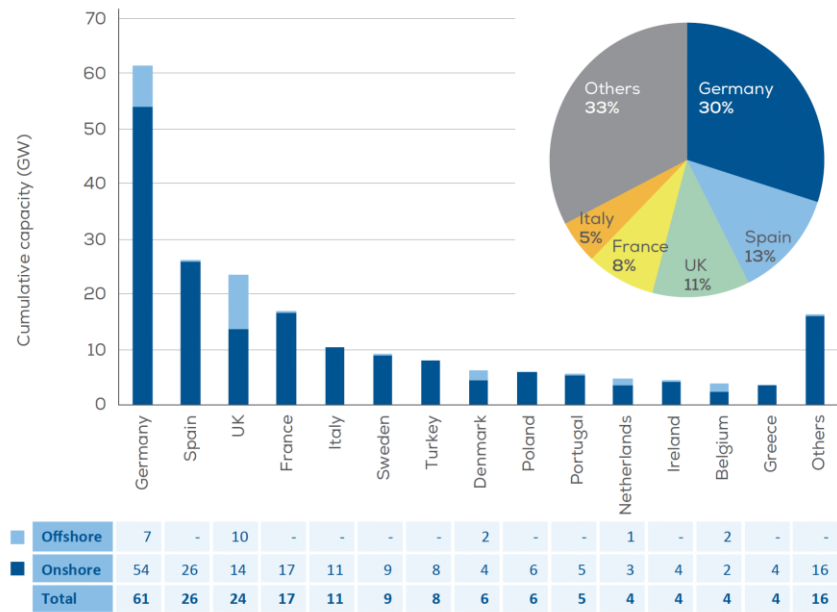
4.3.6. Nuevos recursos energéticos marinos

Dentro de los nuevos recursos energéticos marinos veremos la producción eólica *offshore* y los hidratos de gas.

4.3.6.1. La producción eléctrica eólica *offshore*

Como se indicaba en la introducción, la producción eólica *offshore* es una tecnología que está experimentando un importante crecimiento en los últimos años, con Europa liderando su implantación de forma que en países como el Reino Unido ya supone más del 16% del suministro eléctrico y Alemania supera ya el 12% [293]. El fuerte desarrollo de la tecnología *offshore* en el Mar del Norte se ha debido a la combinación de un recurso de buena calidad, a una profundidad del mar asequible [293] compatible con cimentaciones fijas y a la experiencia y conocimiento de la tecnología *offshore* procedente de la explotación de hidrocarburos. Fuera de Europa, China se ha incorporado con fuerza desde 2016 (Figura 101 y Figura 102) [293].

Entre las ventajas de la energía eólica *offshore* se encuentra una mayor disponibilidad del recurso ya que no solo el viento es más frecuente, sino que se produce con mayor intensidad y son más estables [294]. Esto es especialmente relevante ya que la producción es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Por otro lado, las costas suelen ser zonas de gran densidad de población por lo que la producción se acerca al consumo. Otra ventaja adicional es el conocimiento tecnológico. Por una parte, la energía eólica es una tecnología madura y de otra existe un conocimiento amplio de las infraestructuras *offshore* debido a las explotaciones de hidrocarburos en el mar.



Source: WindEurope

Figura 101: Capacidad de las instalaciones eólicas, incluidas la *offshore*, en Europa (2019) [295]

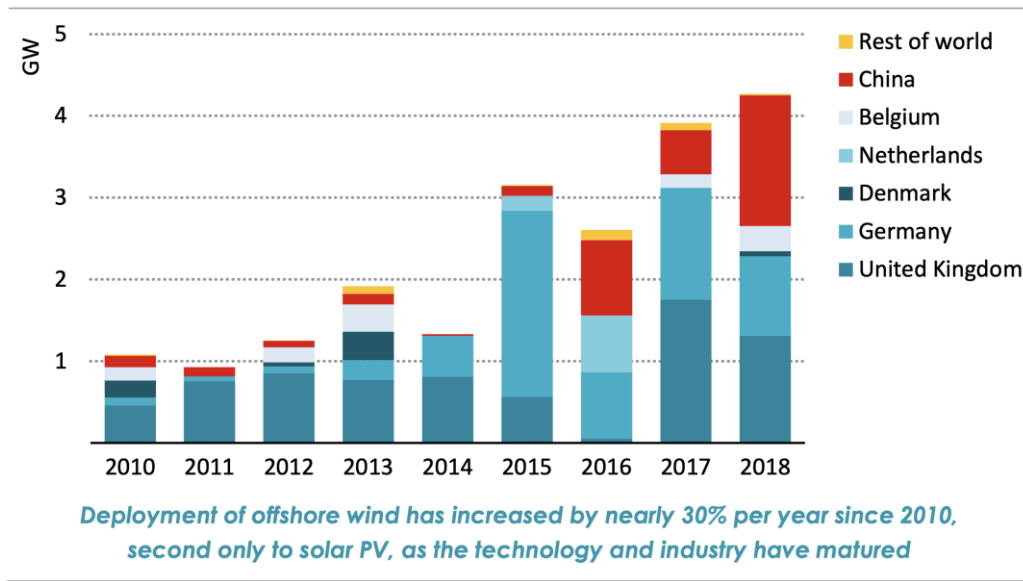


Figura 102: Incrementos anuales de capacidad eólica *offshore* [293]

Las grandes producciones eólicas marinas existentes en la actualidad se sitúan en aguas de relativa poca profundidad, hasta 50 o 60 metros, y aunque su instalación es mucho más compleja que en tierra no supone un desafío que ponga en peligro su desarrollo. En este sentido, la cuestión fundamental es la cimentación de los aerogeneradores, para el que existen tres sistemas fundamentales. El monopilote, que se utiliza en aguas muy poco profundas (hasta 15 m) que consiste en un cilindro de acero hincado en el suelo marino a hasta 30 m de profundidad [296]. En la actualidad se están fabricando monopilotes de hasta 10 m de diámetro y 120 m de longitud y 150 mm de espesor, con pesos de hasta 1.500 toneladas para sustentar aerogeneradores cada vez más grandes y pesados [297]. Este sistema es el más usado en la actualidad, siendo el empleado en el 82% de los aerogeneradores en Europa a finales de 2018 [298]. La cimentación de gravedad consiste en una plataforma de hormigón o de acero que se sitúa sobre el suelo marino, que previamente requiere ser preparado [296]. La masa de la cimentación proporciona estabilidad frente a las acciones del mar (corrientes y olas) así como a las acciones propias del aerogenerador. Este sistema se utiliza hasta 30 m de profundidad o en profundidades menores, pero con subsuelos marinos rocosos que dificulten el hincado de los monopilotes. También en el caso de zonas especialmente sensibles al ruido o vibraciones del hincado de monopilotes por la presencia de animales marinos sensibles [297]. Por el último, para las mayores profundidades dentro del rango se utiliza una cimentación tipo *jacket*, consistente en una estructura metálica compleja en forma de celosía con tres o mucho más comúnmente cuatro puntos de anclaje fijados al suelo mediante pilotes [296].

España, aún manteniendo una posición importante en producción eólica convencional (es el segundo país de Europa por potencia instalada con 23,5 GW), la presencia en eólica *offshore* es muy testimonial y se reduce a instalaciones experimentales. Esto supone un serio peligro de quedarse atrás en esta tecnología con gran proyección de futuro. Si bien es cierto que la velocidad media del viento es inferior a los principales países productores, sí que existen algunas zonas donde se aproxima bastante a estas. Es, por ejemplo, el caso de Galicia, áreas de Cataluña, del Estrecho, del Mar de Alborán y de las Islas Canarias. El problema fundamental se encuentra en el rápido descenso de la plataforma continental en España, de forma que ya a la distancia de la costa a la que se suelen ubicar estas infraestructuras la profundidad es muy elevada [299] (Figura 105). La utilización de cimentaciones fijas está limitada a aguas poco profundas de hasta 50-60 m de profundidad. Las aguas más profundas requieren de soluciones flotantes que, aunque en la actualidad todavía suponen un sobre coste importante respecto a las cimentaciones fijas, se espera que se vaya reduciendo en los próximos años [300]. En este sentido ya está en funcionamiento un parque de 30 MW con cinco aerogeneradores en Escocia propiedad de Equinor (antigua Statoil, petrolera pública noruega), situada a 25 km de la costa en aguas con profundidades que van desde 95 a 120 m. En Portugal, a 20 km de la costa de Viana do Castelo, cerca de la frontera con Galicia, se está desarrollando el proyecto *Windfloat Atlantic* con 25 MW con tres aerogeneradores y que cuenta con participación española ya que Repsol participa con un 19,4% dentro del consorcio Windplus, y la construcción de una de las tres plataformas por parte de la UTE Navantia-Windar en Fene y Avilés (Figura 103). Esta última ha sido también adjudicataria en febrero de 2019 de otras cinco unidades para el campo Kinkardine en Reino Unido y previamente habían construido las unidades del proyecto *Hywind* de Equinor mencionado anteriormente [301]. La diferencia tecnológica de las estructuras flotantes de los proyectos Hywind y Windfloat es que en el primer caso son

unidades de cilindro único tipo spar [302], mientras que en el segundo caso se trata de estructuras semisumergible [303]. El hecho de que la construcción de las estructuras flotantes de los mayores parques eólicos *offshore* de este tipo se estén desarrollando en España es fundamental para disponer de la experiencia y el conocimiento de forma que en el momento en el que los costes de la tecnología eólica flotante lo permitan pueda realizarse el despliegue.



Fuente: EDP Renováveis

Figura 103: Traslado de la plataforma y aerogenerador correspondientes a la primera unidad del proyecto *WindFloat*

En lo que respecta a las ventajas de cada sistema, en el caso de la plataforma semisumergible se tiene una gran flexibilidad para diferentes profundidades del mar, tiene pocos requisitos para su transporte consistiendo básicamente en remolcadores, el aerogenerador puede ser montado en tierra y es posible realizar reparaciones en puerto. En el caso de la boya spar las ventajas son un diseño sencillo que permite una fabricación en serie y tiene unas características de estabilidad excelentes. En la parte de los inconvenientes, la plataforma semisumergible tiene una masa estructural elevada y estructuralmente compleja, así como unos sistemas de lastre más costosos, mientras que en el caso de la boya spar su uso está indicado únicamente para profundidades elevadas, el aerogenerador debe ser montado en el mar de forma que el proceso es mucho más complejo que el montaje en tierra y por último el transporte es más complejo lo que puede complicar la posibilidad de realizar reparaciones importantes en tierra [304]. Una tercera opción para la cimentación de los aerogeneradores sería una plataforma tipo *Tensión Leg*, análoga a la vista en la extracción de hidrocarburos. Entre sus ventajas estarían su estabilidad, poca masa estructural, pueden montarse en tierra y pueden usarse en profundidades entre 50 y 60 m. Entre sus inconvenientes estarían su transporte hasta su ubicación, ya que por su diseño pueden tener problemas de estabilidad durante el transporte y pueden requerir buques especiales. Otro inconveniente es un sistema de anclaje más costoso, así como posibles graves problemas en caso de fallo de uno de los anclajes [304], [305].

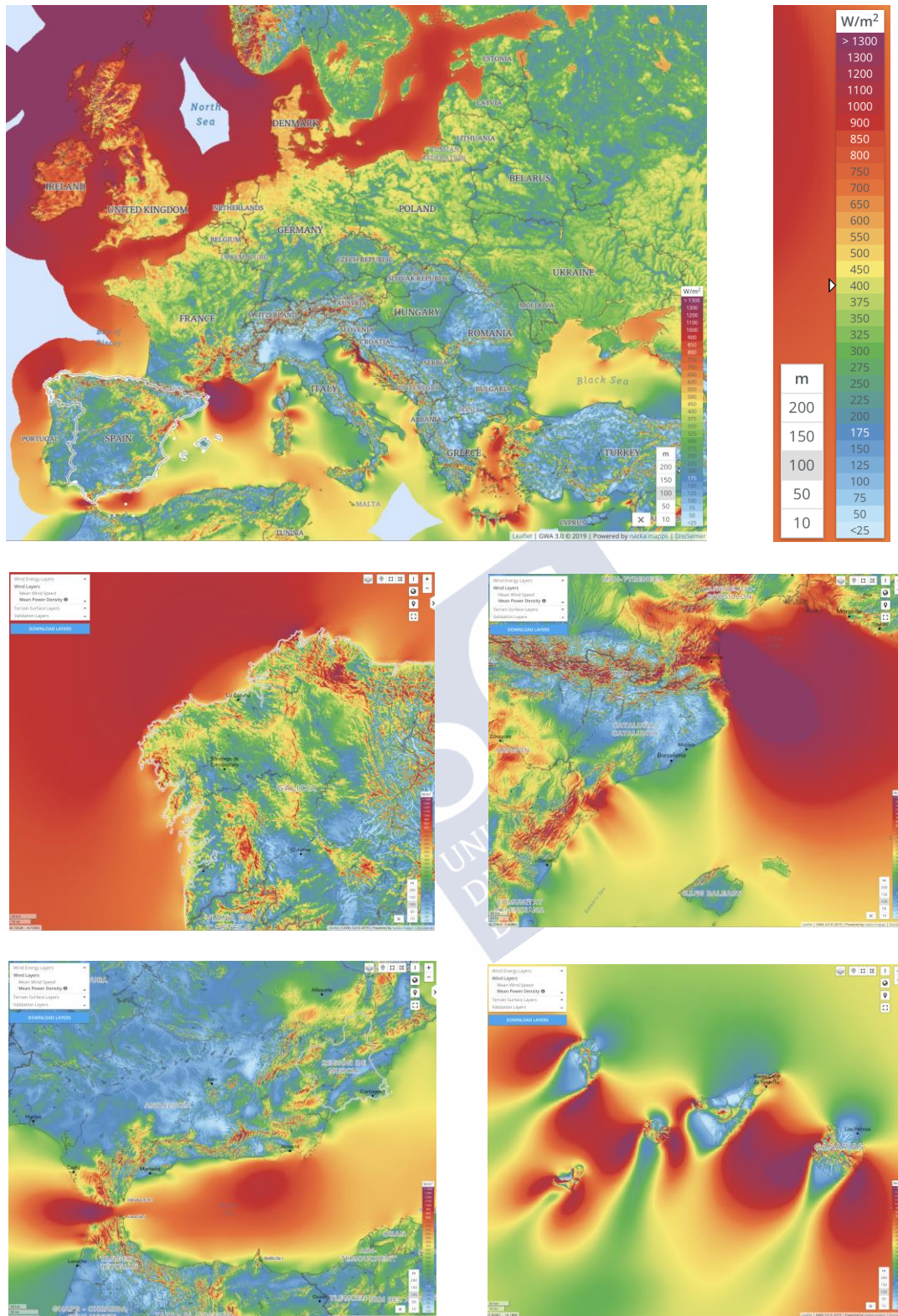
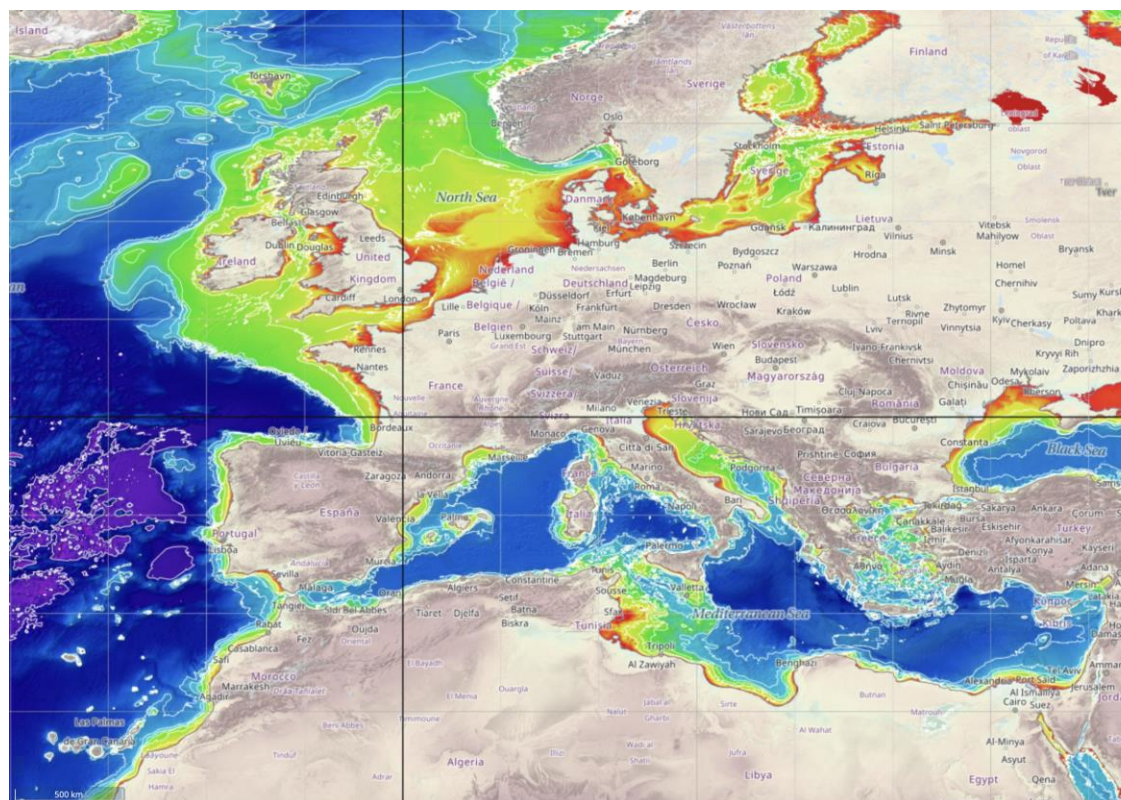


Figura 104: Densidad media de potencia (W/m^2) [306]

Mapa obtenido de “Global Wind Atlas 3.0, una aplicación gratuita basada en la web desarrollada, propiedad y operada por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU). El Global Wind Atlas 3.0 se lanza en asociación con el Grupo del Banco Mundial, utilizando los datos proporcionados por Vortex, utilizando los fondos proporcionados por el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (ESMAP).

Para información adicional: <https://globalwindatlas.info>



**Figura 105: Profundidad del mar en las costas europeas
A partir de herramienta GIS de EMODnet Bathymetry [307]**

En definitiva, de los progresos que tengan lugar en las infraestructuras flotantes *offshore* va a depender el posible desarrollo en España de esta tecnología, por lo que una vez confirmada la existencia del recurso y solventado el problema relativo a la profundidad de la costa española habrá que enfrentarse con los aspectos regulatorios. En este sentido el gobierno aprobó en abril de 2009 el “Estudio estratégico ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos” [308], en el que a partir del análisis de los impactos sobre otras actividades se elaboró una zonificación para la instalación de parques eólicos *offshore*. Para el análisis de los impactos se tuvieron en cuenta sobre todo zonas con diferentes estados de protección ambiental, de protección del patrimonio arqueológico sumergido, diferentes planes de ordenación del territorio, recursos y actividades pesqueras, paisaje y restricciones debidas a actividades asociadas al Dominio Público Marítimo-Terrestre. El resultado de esta zonificación fue el establecimiento de tres zonas (Figura 106): 1) Zonas de exclusión, no aptas para la instalación, 2) Zonas aptas con condicionantes ambientales, en el que habrá que evaluar ambientalmente el impacto individual de cada proyecto y 3) Zonas aptas, en las que no se han detectado posibles afecciones ambientales. En cualquier caso, en cada proyecto sería necesario elaborar una evaluación de impacto ambiental (RDL 1/2008). Hay que destacar sobre este estudio que su ámbito espacial se limita a 24 millas náuticas, es decir, las aguas territoriales y la zona contigua, por lo que la zona económica exclusiva no está incluida ya que estudio la considera suficiente dado el estado del arte de la tecnología en ese momento. Los aspectos administrativos relativos al proceso de autorización de los parques eólicos marinos están regulados por el RD 1028/2007 y se limita al mar territorial. Este RD fue modificado por dos Reales Decretos posteriores: RD 1485/2012 y RD 1074/2015.

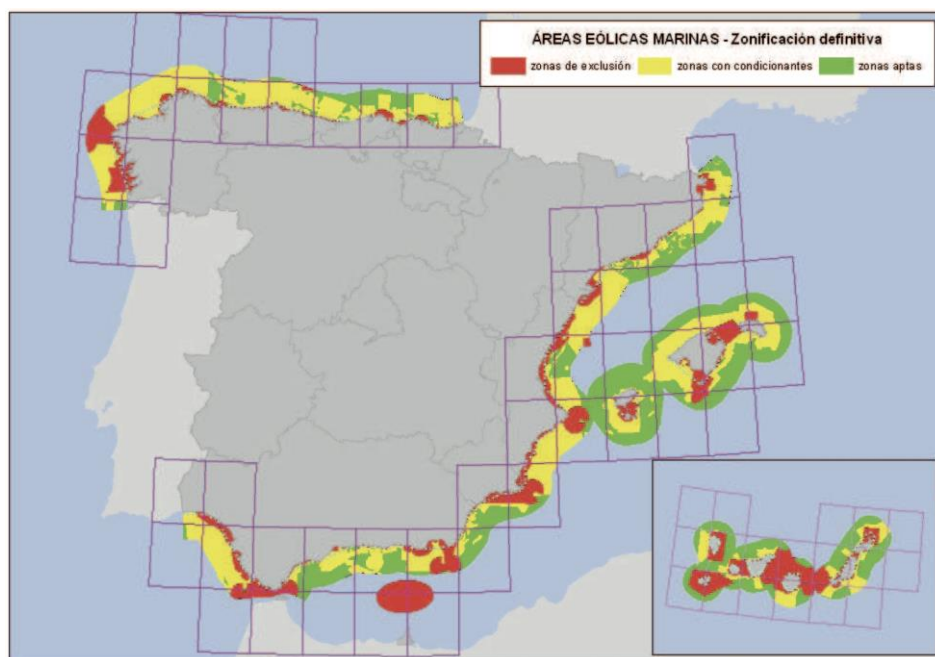


Figura 106: Zonificación eólica *offshore* España [308]

El potencial de la energía eólica *offshore* es enorme. La Agencia Internacional de la Energía calcula que a nivel mundial el potencial técnico es de más de 120.000 GW, con una producción anual de 420.000 TWh al año lo que supondría 11 veces la demanda eléctrica estimada para 2040. Estas cifras serían considerando desarrollada la tecnología flotante. Pero aún teniendo en cuenta el potencial en aguas de profundidades correspondientes a cimentaciones sobre el suelo marino, como las que están en pleno desarrollo actualmente, el potencial técnico estaría en 87.000 TWh año y doblaría la demanda prevista para 2040 [293]. En definitiva, no solo habría capacidad para satisfacer la demanda de electricidad, sino que se podría producir electricidad expresamente para obtener otros transportadores energéticos, particularmente hidrógeno, de forma renovable. Como ya se ha visto anteriormente el hidrógeno es clave para la descarbonización de sectores y tecnologías de difícil electrificación, como el transporte pesado (camiones y particularmente barcos y aviones).

En general, los modelos analizados prevén un fuerte crecimiento de la tecnología eólica *offshore* debido a una combinación de factores: 1) El enorme potencial del recurso, 2) la disminución de los costes de la tecnología, que aunque se han reducido solo un 5% en el período 2010-2018, se esperan disminuciones mucho mayores en los próximos años [309], de forma que se prevé que alcance rentabilidades equiparables a otras tecnologías tanto renovables como no renovables a nivel global en la década de los veinte, aunque ya hay mercados europeos en donde ya no solo es competitiva, como en caso de Alemania, sino que en el caso del Reino Unido está entre las tecnologías más competitivas [309], 3) los avances tecnológicos relacionados con aerogeneradores de cada vez mayor tamaño y la consolidación de la tecnología flotante, 4) la posibilidad de instalaciones dedicadas a producir hidrógeno, 5) la adopción de políticas energéticas de fomento de las energías renovables.

No obstante, hay que tener en cuenta que las previsiones que se están realizando son bastante volátiles. En este sentido en la predicción de IRENA de 2019 prácticamente se duplica las capacidades anuales instaladas respecto a las proyecciones realizadas por el mismo organismo en 2018 (Figura 107 y Figura 108). Aunque en parte puedan justificarse

estas grandes diferencias en las previsiones por el momento que está ganando la tecnología y los resultados satisfactorios de los primeros parques flotantes de cierta entidad, como el caso ya visto de *Hywind*, las diferencias en las previsiones son tan importantes que parece necesario contemplarlas con cierta prudencia.

Aunque en este momento Europa lidera con claridad la eólica *offshore* y se prevé que continúe haciéndolo durante al menos una década, será China en menos de dos décadas la que tomará el liderazgo. También se espera un fuerte incremento en Norteamérica (Figura 109) [309].

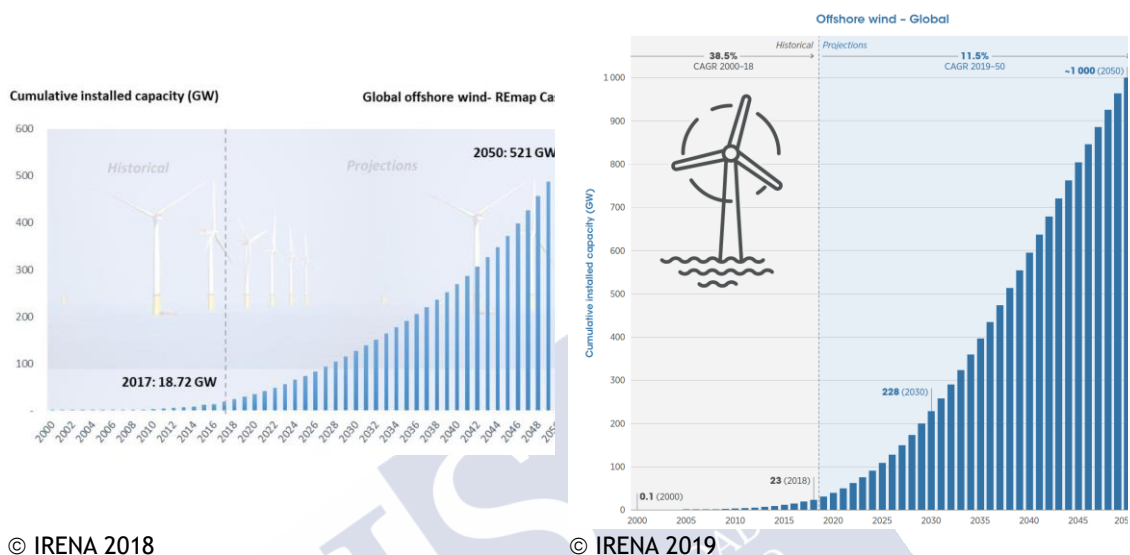


Figura 107: Capacidad eólica *offshore* instalada histórica (hasta 2017) y proyectada (estimación 2018) [310]

Figura 108: Capacidad eólica *offshore* instalada histórica (hasta 2017) y proyectada (estimación 2019) [309]

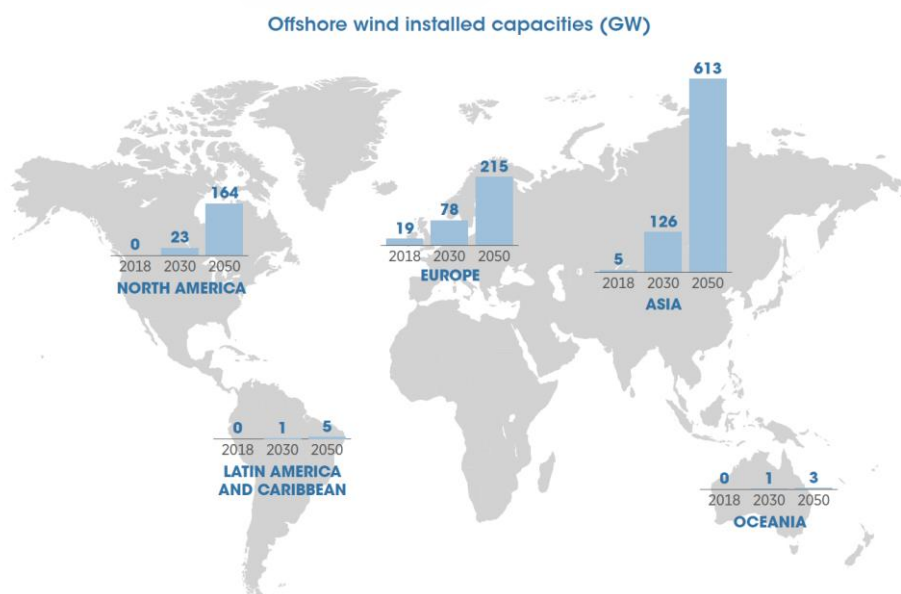


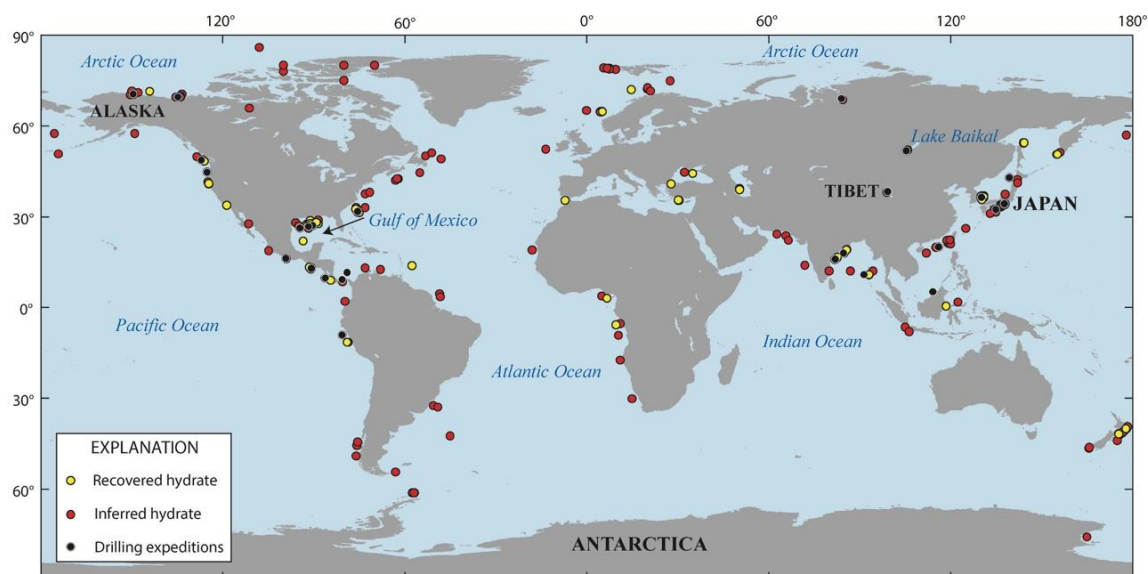
Figura 109: Previsión de capacidad instalada *offshore* por regiones mundiales [309]

4.3.6.2. Los hidratos de gas

Los hidratos de gas son sólidos cristalinos formados por gas (CH_4) y agua en determinadas condiciones de presión y temperatura, por lo que no es estable a nivel del mar. Básicamente podríamos decir que se trata de metano encapsulado en agua congelada y su aspecto es como el hielo.

Existe en grandes cantidades, tanto en sedimentos marinos, en taludes continentales, en todos los continentes (Figura 110) y en el permafrost del ártico, donde ya se han realizado prospecciones. Se estiman enormes reservas de gas [311] que estudios cuantifican en 1.146 gigatonnes de metano [312] y otros elevan mucho esta cantidad [271]. La mayor parte de las reservas conocidas se encuentran a profundidades de entre 500 y 2000 m, aunque también se pueden formar en lugares con emanaciones frías y en volcanes de lodo [313]. A pesar de la constancia de estas grandes reservas sobre la producción solo se puede especular debido a que solo se han realizado experimentos a pequeña escala en los campos de prospección y todavía no se han desarrollado métodos definitivos para la explotación del recurso. En principio son tres los métodos que parecen factibles para la liberación del gas: el incremento de temperatura, la disminución de la presión en la formación geológica y la activación química mediante la inyección de CO_2 que libera el metano y se intercambia con él en la estructura del hidrato [313]. En el primer caso, el incremento de temperatura se llevaría a cabo mediante el bombeo de agua caliente a través de un pozo hasta el yacimiento. Sin embargo, este método demanda grandes cantidades de energía. En el segundo caso, el descenso de la presión podría obtenerse perforando los depósitos desde arriba para liberar la presión debida al agua y a los sedimentos que los recubren, sin embargo, este método tiene la desventaja de que la disociación del hidrato decrece con el tiempo debido a que la propia liberación del metano vuelve a incrementar la presión existente; además también se produce liberación de agua haciendo el depósito menos salino y dificultando la disociación y por último la reacción que tiene lugar debido a la despresurización es endotérmica, ya que se requiere energía para romper los enlaces de hidrógeno, por lo que se enfría el ambiente y dificulta la disociación de los hidratos. En el tercer caso, la inyección del CO_2 reemplaza al CH_4 en el hidrato que crea un enlace más fuerte con la molécula de agua que con el metano. El CO_2 se inyectaría en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico (en forma de fluido supercrítico) para acelerar el intercambio [271]. La despresurización y la inyección de CO_2 son los métodos que aparecen como económicamente viables. Sin embargo, la inyección de CO_2 tendría como ventaja adicional el convertir el yacimiento de hidratos de gas en un almacenamiento de CO_2 [313].

En principio, despertó mucho interés debido a que la abundancia y la dispersión del recurso podía suponer ventajas como el incremento en la seguridad del suministro energético al disponer de una fuente adicional y como medida de disminuir la dependencia energética de los países que no disponen de recursos naturales de gas convencionales tanto *onshore* como *offshore*. En este sentido se crearon proyectos internacionales como es el caso a nivel europeo del proyecto MIGRATE que comenzó en marzo de 2015 y tiene prevista la finalización en marzo de 2019. A nivel nacional, en Europa se desarrollan acciones como el proyecto SUGAR en Alemania, cuya tercera fase concluyó en diciembre de 2017 y en Noruega el proyecto de investigación CAGE (*Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate*) estudia los impactos de la liberación del metano en el medio ambiente marino y en el sistema climático. En el caso de Japón se trabaja con el objetivo del lanzamiento de proyectos privados para la comercialización en el entorno de la mitad de la década de 2020 [314].



Fuente: USGS

Figura 110: Hidratos de gas y localización [311]

En lo que respecta a España se han identificado dos localizaciones con posibles yacimientos de hidratos de gas: el Golfo de Cádiz y en el noroeste en la zona conocida como *Gran Burato*.

A raíz del hundimiento de petrolero *Prestige* en noviembre de 2002, en años posteriores se desarrolló el proyecto ERGAP (Determinación y valoración de los Riesgos Geoambientales en el Área de hundimiento de *Prestige*) [315] llevado a cabo por el Departamento de Geología Marina del Instituto de Ciencias del Mar del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) junto con la Universidad de Cádiz y la Universidad de Vigo. En el marco de ese proyecto se constató la presencia de la estructura geológica [316] 4240 GGPM (*Galician Giant Pock Mark*), ya detectada previamente por los estudios realizados para la caracterización de la Zona Económica Exclusiva de España. Posteriormente, en la campaña Marbanga de 2009 de la Universidad de Vigo para el estudio del paleoclima y la dinámica sedimentaria del margen costero del Banco de Galicia también se tenía como objetivo paralelo el estudio de los ecosistemas y condiciones que se dan en este tipo de estructuras [317]. La estructura está a una profundidad de 1700 m en la Zona Económica Exclusiva de España, tiene un diámetro de entre 3000 y 4000 m de forma circular y con una profundidad de 375 m y en el entorno existen otras dos formaciones de menor profundidad: Burato Cheo (de forma irregular, con 4000 m de diámetro y 60 m de profundidad) y A Orella (de forma elíptica, de entre 3500 y 5000 m y una profundidad de 165 m) [318].

Los trabajos de prospección se realizaron en dos fases, en octubre y noviembre de 2010 y en agosto y septiembre de 2011 en el buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa mediante convenios entre la Xunta de Galicia e investigadores liderados por la Universidad de Vigo. La suma de estos convenios fue de 1,26 millones de euros [319], y aunque en ellas se detectó la presencia de gas tanto en el subsuelo como en forma de hidratos [318] hasta la fecha no se han publicado los resultados.

4.3.7. Impactos medioambientales de la explotación de los recursos minerales y energéticos marinos

Los impactos ambientales de las actividades asociadas al aprovechamiento de los recursos marinos son especulativos, fundamentalmente por dos razones: poca experiencia en estas actividades (circunscritas a un número limitado de prospecciones) y conocimiento muy limitado de las profundidades marinas [320]. También es necesario tener en cuenta los procedimientos de extracción, que están en buena medida por desarrollar.

La identificación de los impactos ambientales debe tener en cuenta todas las actividades asociadas a la explotación: la prospección, la extracción y el transporte.

En principio los impactos asociados a todos los recursos marinos descritos estarían asociados a la alteración o destrucción de superficies y a la biota existente en ellas, cambios químicos en el medio marino del entorno por partículas en suspensión y alteraciones sensoriales a los seres vivos debido a la actividad (luz, ruidos, ...) [320].

En el caso de los sulfuros polimetálicos hay que tener en cuenta además que en los depósitos activos existe vida animal previamente desconocida para la ciencia, con unas 500 especies desarrolladas en entornos de agua caliente y H_2S [290]. Habrá que tener en cuenta por lo tanto los impactos biológicos que tendrá la actividad no solo de la eliminación o reducción de las poblaciones durante la extracción sino también como afectará a los procesos de recolonización. Dada la falta de experiencia existente en la actividad extractiva hay estudios que ven las erupciones volcánicas como el evento natural con mayor analogía [321] aunque en este caso se trate de episodios violentos y en la actividad humana se puedan incorporar medidas que mitiguen los impactos. En el caso de las erupciones volcánicas se ha observado que la recolonización se ha realizado dependiendo de las poblaciones vecinas y con selección de especies que se adaptan a los cambios fisicoquímicos que se han producido [321]. Si las extracciones se realizan sobre conductos inactivos los impactos serían probablemente más perjudiciales [321] al ser lugares donde solo en ellos se desarrollan grandes poblaciones de determinadas especies que podría llevar siglos recuperar de forma madura, lo que reforzaría la idea de medidas como el establecimiento de zonas de preservación en estos casos [322].

Las montañas marinas, en donde se encuentran las cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto, son zonas con altos niveles de biodiversidad y comunidades biológicas únicas, aunque también existe un gran desconocimiento del medio, sobre todo en zonas ya identificadas como explotables [291]. También es necesario evaluar los efectos de las corrientes en las rutas de dispersión de los sedimentos que se producirán por la actividad extractiva [320].

Por último, en el caso de los hidratos de gas, la desestabilización de los depósitos podría provocar deslizamientos de tierra submarina con consecuencias que serían proporcionales a la magnitud del deslizamiento, pudiendo provocar olas de gran tamaño. También es necesario tener en cuenta la posible liberación de CH_4 , que es un importante gas de efecto invernadero, durante los trabajos de explotación. Sustancias asociadas a los hidratos pueden causar un alto impacto en el entorno de la explotación [320].

4.3.8. Impactos de la explotación de los recursos minerales y energéticos marinos sobre otras actividades

Además de sobre el medio ambiente, la exploración de los recursos minerales y energéticos tendrán impactos sobre otras actividades, como la pesca, las infraestructuras (por ejemplo, cables submarinos), el tráfico marítimo, actividades militares, elementos patrimoniales subacuáticos y la biotecnología que necesita elementos de la biota que pueden verse afectados por las actividades extractivas. En este sentido, se han

desarrollado también estudios en donde se caracterizan los fondos marinos como proveedores de bienes y servicios entre los que figuran compuestos químicos para usos industriales y farmacéuticos. En este sentido las profundidades marinas representan el mayor almacenamiento de recursos genéticos y biológicos de gran importancia para la biotecnología [323].

Estos impactos no son en absoluto menores ya que el espacio marítimo es clave para el comercio mundial y es necesario garantizar el buen uso de este espacio para mantener la estabilidad internacional [219] por lo que la Estrategia de Seguridad Nacional lo incluye, dentro de los espacios comunes globales, como uno de los cinco objetivos generales de la seguridad nacional [219].

Tabla 54: Impactos medioambientales de los recursos minerales y energéticos marinos [288], [290], [291], [320]

NODULOS POLIMETÁLICOS	SULFUROS POLIMETÁLICOS	CORTEZAS DE FERROMANGANESO RICAS EN COBALTO	EÓLICA OFFSHORE	HIDRATOS DE GAS
<ul style="list-style-type: none"> - Alteración/destrucción de superficies - Cambios químicos debido a las partículas en suspensión - Alteraciones sensoriales a los seres vivos debido a la actividad: luz, ruidos 				
-	Vida animal previamente desconocida para la ciencia: 500 especies desarrolladas en entornos de agua caliente y H_2S			
-	Menores impactos en los depósitos inactivos			
		<ul style="list-style-type: none"> - Las montañas marinas tienen altos niveles de biodiversidad y comunidades biológicas únicas - Desconocimiento del medio, sobre todo en zonas ya identificadas como explotables - Efectos de las corrientes en las rutas de dispersión de los sedimentos 		
				<ul style="list-style-type: none"> - La desestabilización de los depósitos podría provocar deslizamientos de tierra submarina - Liberación de CH_4 (gas de efecto invernadero) durante los trabajos de explotación - Sustancias asociadas a los hidratos pueden causar un alto impacto en el entorno de la explotación

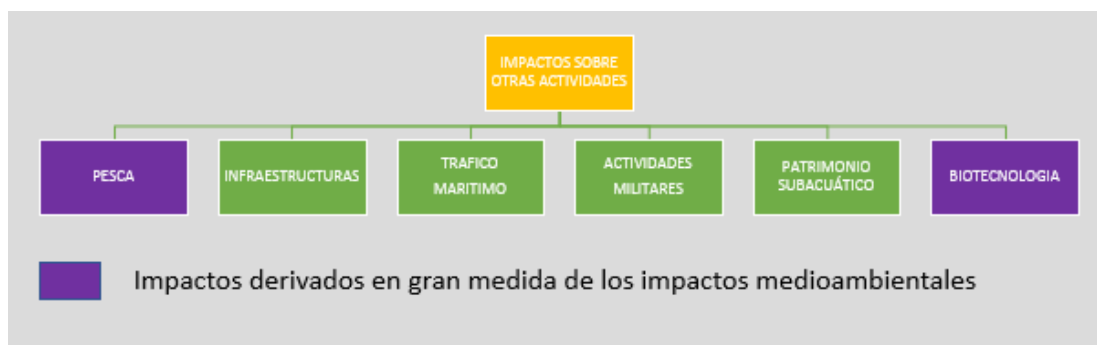
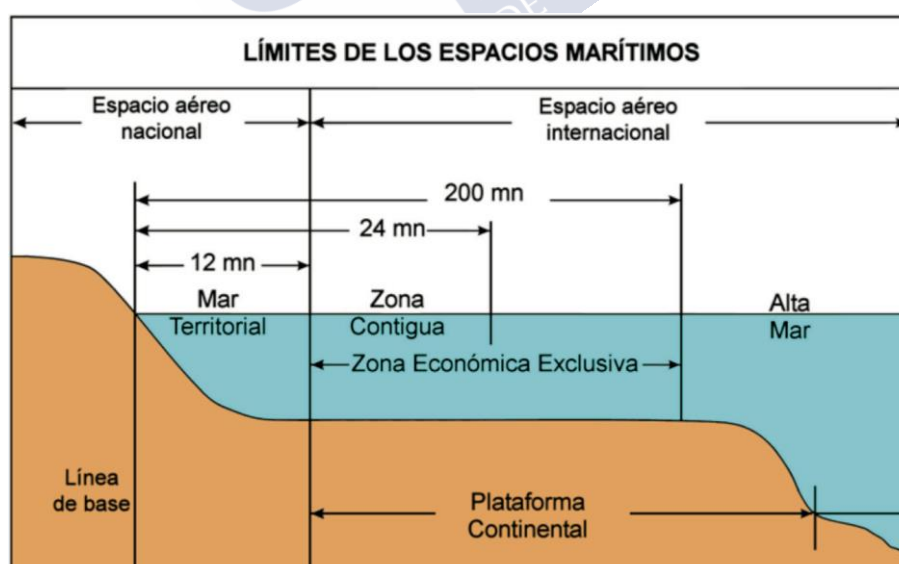


Figura 111: Impactos de la explotación de los recursos minerales y energéticos marinos sobre otras actividades (autor)

Entre los impactos que puede causar la explotación de los recursos minerales y energéticos marinos se encuentran posibles conflictos de delimitación. Debido a que las aguas internacionales no están bajo la jurisdicción de ningún país, la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA) fue creada a partir de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho de Mar de 1982 como un organismo autónomo que se encarga de la administración de los recursos económicos de la Zona, siendo esta el lecho marino más allá de las 200 millas (o hasta 350 millas en caso de autorización a los estados). Como incertidumbre se podría indicar la capacidad que pueden tener este tipo de organismos para mantener los criterios fijados en caso de conflicto. La presencia en los fondos marinos de materias primas y recursos energéticos valiosos para los sectores estratégicos de los estados puede generar situaciones de conflicto por la competición por dichos recursos [219].



Fuente: Manual del Derecho del Mar. Ministerio de Defensa (1 milla náutica (mn) = 1.852 m---
<https://publicaciones.defensa.gob.es/manual-de-derecho-del-mar-i.html>

Figura 112: Delimitación de Aguas Territorias, Zona Económica Exclusiva y Aguas Internacionales [324]

La zona de soberanía de un Estado costero está constituida por las aguas interiores y el mar territorial. En las aguas interiores el Estado puede denegar el acceso a buques extranjeros (salvo en situación de peligro). En definitiva, se regula el acceso a los puertos. En el caso del Mar Territorial (hasta el límite de 12 millas desde la línea de costa), aunque pertenece a la soberanía del Estado, la Convención del Derecho del Mar reconoce el derecho de paso inocente a los buques extranjeros. Este derecho consiste en el paso rápido e ininterrumpido y derecho a detenerse y fondear (esto último puede suspenderse en determinados casos) [220].

En la actualidad la mayor parte de los conflictos de delimitación tienen lugar en las aguas territoriales y en la Zona Económica Exclusiva, que es la zona en la que el Estado ribereño tiene soberanía para los fines de explotación, conservación y administración de los recursos naturales y para la producción de energía derivada del agua, las corrientes y los vientos, así como el establecimiento de islas artificiales, instalaciones y estructuras. En principio cualquier Estado, sea o no costero, tiene derecho a tender cables y tuberías submarinas en la Zona Económica Exclusiva, pero deben hacerlo de acuerdo a las regulaciones del Estado costero y en cualquier caso este tiene el derecho exclusivo para la autorización de perforaciones en su Zona Económica Exclusiva [220]. Los derechos de los estados, tanto en la zona de soberanía como en la Zona Económica Exclusiva alcanzan a la columna de agua, al suelo marino, al subsuelo. En el caso de la zona de soberanía el alcance incluye el espacio aéreo. La delimitación del mar territorial se realiza mediante el procedimiento establecido en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar de 1982, que en su artículo 15 establece que “Cuando las costas de dos estados sean adyacentes o se hallen situadas frente a frente, ninguno de dichos Estados tendrá derecho, salvo acuerdo en contrario, a extender su mar territorial más allá de una línea media cuyos puntos sean equidistantes de los puntos más próximos de las líneas de base a partir de las cuales se mida la anchura del mar territorial de cada uno de esos Estados. No obstante, esta disposición no será aplicable cuando, por la existencia de derechos históricos o por otras circunstancias especiales, sea necesario delimitar el mar territorial de ambos Estados en otra forma.” [325]. Es precisamente en esta última frase donde se puede encontrar el origen de conflictos de delimitación, y es que, aunque el método pretende ser objetivo puede perjudicar a unos u otros Estados dependiendo de la forma de sus costas e incluso de construcciones portuarias permanentes que se consideran parte de la costa y cuya construcción puede generar problemas de delimitación como sucede, por ejemplo con el puerto de Beni Enzar que entra en conflicto con la delimitación de Melilla [324].

La propia Convención, en su capítulo XV, establece los procedimientos para la solución de controversias derivadas de las posibles interpretaciones de la Convención, empezando en primer lugar por la negociación entre los Estados y si esta no se produce o no se llega a acuerdo es posible acudir a uno o varias de las siguientes instituciones o medios: El Tribunal Internacional del Derecho del Mar, la Corte Internacional de Justicia o bien tribunales arbitrales constituidos según la propia Convención [325]. De estas instituciones se está utilizando de forma especial la Corte Internacional de Justicia (Tabla 55).

En diversos países los conflictos de delimitación marítima se han convertido en situaciones que condicionan la política tanto interior como exterior de estos países, de forma que periódicamente rebrota la tensión ya sea en períodos electorales, por actuaciones voluntarias o involuntarias, por ejemplo de pesqueros y que en algunos casos

han llegado a situaciones cercanas al conflicto armado (Colombia-Venezuela en 1987) [326].

Tabla 55: Ejemplos de controversias planteadas por diferentes Estados ante las instancias definidas por la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar de 1982 [327], [328], [329]

CORTE INTERNACIONAL DE JUSTICIA
Delimitación marítima en el mar Caribe y el Océano Pacífico (Costa Rica c. Nicaragua)
Obligación de negociar el acceso al Océano Pacífico (Bolivia c. Chile)
Cuestión de la delimitación de la plataforma continental entre Nicaragua y Colombia más allá de las 200 millas marinas contadas desde la costa de Nicaragua (Nicaragua c. Colombia)
Presuntas violaciones de derechos soberanos y espacios marítimos en el mar Caribe (Nicaragua c. Colombia)
Delimitación marítima en el Océano Índico (Somalia c. Kenia)
Controversia sobre la situación y la utilización de las aguas del Silala (Chile c. Bolivia)
Controversia marítima (Perú c. Chile)
Controversia territorial y marítima (Nicaragua c. Colombia)
Delimitación marítima en el Mar Negro (Rumania c. Ucrania)
Controversia sobre derechos de navegación y derechos conexos (Costa Rica c. Nicaragua)
Delimitación marítima entre Nicaragua y Honduras en el Mar del Caribe (Nicaragua contra Honduras)
Fronteras terrestres y marítimas entre el Camerún y Nigeria
Controversia territorial y marítima (Nicaragua contra Colombia)
Delimitación marítima y cuestiones territoriales entre Qatar y Bahrein (Qatar contra Bahrein)
Delimitación marítima entre Guinea-Bissau y el Senegal (Guinea-Bissau contra el Senegal)
Delimitación marítima de la zona situada entre Groenlandia y Jan Mayen (Dinamarca contra Noruega)
Controversia sobre fronteras terrestres, insulares y marítimas (El Salvador contra Honduras)
TRIBUNAL PERMANENTE DE ARBITRAJE DE LA HAYA
Arbitraje sobre el Tratado del Mar de Timor (Timor-Leste v. Australia)
TRIBUNAL INTERNACIONAL DE DERECHO DEL MAR
Controversia relativa a la delimitación de la frontera marítima entre Bangladesh y Myanmar en la Bahía de Bengala (Bangladesh/Myanmar) (Caso N° 16)
Controversia por la delimitación de la frontera marítima entre Ghana y Costa de Marfil (Caso N° 23)

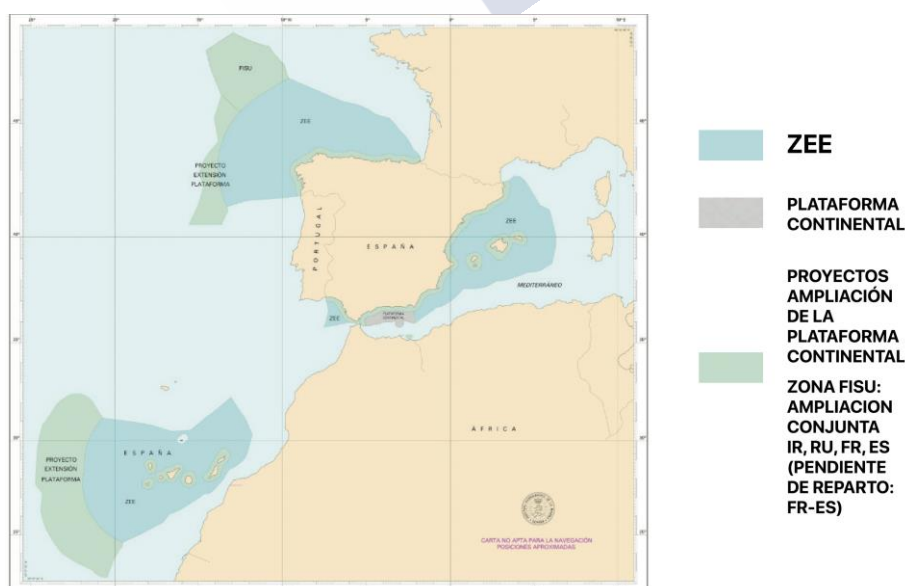
Si estos conflictos suceden entre países internacionalmente reconocidos con fronteras establecidas estas situaciones pueden ser incluso más complejas en casos en los que los territorios en conflicto no están reconocidos a nivel internacional. Durante el 2018 las tensiones entre Rusia y Ucrania por el mar de Azov y el estrecho de Kerch, que hasta la anexión de Crimea por parte de Rusia era la principal cuestión territorial entre Rusia y Ucrania, que en 2003 firmaron un acuerdo por el que consideraban en mar de Azov como compartido y uso libre y donde se podría registrar cualquier embarcación que estuviera fuera de las 12 millas del mar territorial del otro país. Los buques militares debían informar a la otra parte para su circulación. La construcción de un puente por parte de Rusia ha empeorado la situación en tanto que les facilita el control del acceso de los buques. Además, el gálibo del puente tiene 35 m sobre el nivel del agua y dificulta el paso de los barcos más grandes. El apresamiento de dos patrulleras y un remolcador ucraniano,

así como la apertura de fuego contra esos navíos en noviembre de 2014 ha generado una escalada de tensión muy importante en la zona [330] [331].

En lo que respecta a España, el Estado debería tener acordadas un total de 30 delimitaciones, de las que únicamente tiene tres y una de ellas no satisfactoria: Francia en el Golfo de Vizcaya (Mar Territorial y Zona Contigua), Portugal en la desembocadura del Miño (con referencias al río Guadiana con discrepancias) e Italia para la Plataforma Continental. En la actualidad hay 12 zonas en litigio [324], con lo que podría haber hasta otras 15 hasta llegar a las 30 delimitaciones (Tabla 56).

Tabla 56: Zonas en litigio de España [324]

Estado	Número de zonas en litigio	Zonas en litigio
Francia	2	Golfo de Vizcaya (ZEE) Mediterráneo (Espacios Marítimos)
Portugal	3	Desembocadura del Miño (ZEE y proyecto de ampliación de la plataforma continental). Desembocadura del Guadiana (ZEE) Entre los archipiélagos de Madeira y de Canarias (ZEE y proyecto de ampliación de la plataforma continental)
Marruecos	6	Plazas de soberanía (Ceuta y Melilla) Islas y peñones Mar de Alborán Estrecho de Gibraltar Golfo de Cádiz Canal entre el continente africano y las Islas Canarias
Argelia	1	Yuxtaposición de la plataforma continental de Argelia y su ZEE con la española.
Reino Unido		Gibraltar. Sin controversia formal, pero con declaración por parte del Reino Unido de una zona de especial conservación (ZEC) declarando España otra ZEC más amplia que superpone a la británica por completo. Denuncia presentada por el Reino Unido ante la Comisión Europea para la anulación de la ZEC española sin que haya sido atendida.



Fuente: Manual del Derecho del Mar. Ministerio de Defensa

<https://publicaciones.defensa.gob.es/manual-de-derecho-del-mar-i.html>

Figura 113: Visión general de los espacios marítimos españoles (leyenda incorporada por el autor) [324]

4.4. DISCUSIÓN

A lo largo de las últimas décadas ha tenido lugar un incremento en la demanda de recursos, tanto minerales como energéticos. A largo plazo esto no sólo no va a continuar, sino que el crecimiento será, por un lado, más intenso y por otro también aumentará la diversidad de los recursos que se demandan. Este aumento será debido a factores como el desarrollo de nuevas tecnologías que requerirá de recursos que los diferentes ámbitos de gobernanza ya han definido como materias primas críticas. Otro factor de incremento de la demanda de recursos son las políticas de industrialización que se están llevando a cabo en diferentes partes del mundo, unas consolidando un crecimiento industrial que se lleva realizando durante las últimas décadas, como es el caso de Asia, otras con un desarrollo muy incipiente como el caso de África, otras con un desarrollo a futuro más incierto como en el caso de Sudamérica y otros con políticas, en este caso de reindustrialización, con poco éxito como sucede en los países desarrollados y en particular en la Unión Europea y está por ver en Estados Unidos después del giro proteccionista de su gobierno. Por último, el aumento previsto para las próximas décadas en la actividad económica en zonas densamente pobladas (sobre todo China e India) además del consiguiente aumento del nivel de vida de su población que le dará acceso a nuevos bienes y servicios, será otro aspecto más que aumentará la demanda de recursos.

Dado que por un lado la corteza oceánica es de mayor tamaño que la continental, está menos explotada y en gran medida no pertenece a la soberanía de ningún estado, es comprensible el interés por los recursos energéticos y minerales marinos. En lo que respecta a la explotación de recursos energéticos, la situación no es nueva en el sentido de que hace décadas que se explotan yacimientos petrolíferos y de gas *offshore* y que esta actividad dispone de una tecnología consolidada. Pero ello no implica que no existan aspectos muy relevantes para la seguridad energética. En este sentido, la disponibilidad de estos recursos supone una gran ventaja para los países en cuyas aguas territoriales o de gestión económica se realizan estas explotaciones ya que en unos casos les permite un desarrollo económico e industrial con precios asequibles y para otros países suponen una gran fuente de ingresos. Todo ello hace pensar que, a pesar de las necesidades de gestión del calentamiento global, va a ser muy difícil que estos países renuncien a esta ventaja competitiva, más aún teniendo en cuenta que el propio Acuerdo de París establece varias velocidades en la descarbonización en función del desarrollo económico de los países, o que haya países que se hayan retirado o que en el futuro se retiren del acuerdo en función de sus necesidades e intereses.

A los recursos energéticos tradicionales se une la posibilidad de la explotación de nuevos recursos energéticos marinos, ya sea porque son propios del medio, como es el caso de los hidratos de gas o la energía de las olas o las mareas, o bien porque las infraestructuras se instalan en el medio marino, como parques eólicos *offshore*, en este último caso con una enorme proyección a nivel internacional (en el caso de Europa, China y Estados Unidos), pero sin que en el caso de España se prevean avances en la instalación de estas infraestructuras. Como parte positiva para España podemos ver que se mantiene el conocimiento ya sea mediante la fabricación de estructuras y componentes o por la promoción por parte de empresas españolas de proyectos en otras partes del mundo. Para la explotación del recurso eólico marino se cuenta con la gran experiencia adquirida en la industria de extracción *offshore* de hidrocarburos. El caso de los hidratos de gas destaca por la gran cantidad de recurso existente y está por ver si su explotación puede ser rentable a medio o largo plazo.

En lo que respecta a la explotación de los recursos minerales, esta actividad todavía no se encuentra en pleno desarrollo industrial y comercial. Sin embargo, genera interés debido a que puede constituirse a medio plazo como una fuente importante de materias primas críticas que en el caso de su extracción en la corteza terrestre no están disponibles para todos los países. Este tipo de recursos se encuentra en los fondos marinos en formaciones minerales de diferente procedencia como los nódulos polimetálicos, las cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto y los sulfuros polimetálicos, en este caso, en zonas con actividad volcánica y en los límites de las placas tectónicas.

La explotación de los recursos minerales y energéticos marinos contribuye a la seguridad energética en el sentido de que aumenta la disponibilidad de los recursos y diversifica su procedencia, disminuyendo dependencias de países que acumulan una mayor cantidad de estos recursos en la corteza continental. Sin embargo, tienen una importante incidencia sobre la seguridad natural, tanto en las diferentes fases de su actividad normal, afectando a los ecosistemas marinos ya sea por las perturbaciones debidas a la exploración por adquisición sísmica o por las acciones mecánicas derivadas de la perforación o construcción de infraestructuras como plataformas petrolíferas, como en eventos excepcionales como es el caso de accidentes en plataformas o en el transporte marítimo de hidrocarburos que provocan grandes derrames de petróleo o mareas negras.

En el caso de los recursos no convencionales parece que los impactos no llegarían a ser catastróficos, pero existirían por la acción mecánica de la recogida que afectaría al suelo marino y a la biota presente en él, así como a las aguas del entorno más próximo o incluso más alejado por la acción de las corrientes marinas. En el caso de los hidratos de gas, además de cierto riesgo de emisiones de metano, se podrían producir deslizamientos de taludes en el fondo marino. El alcance de estos impactos tiene la incertidumbre del limitado nivel de conocimiento de la biodiversidad de los fondos marinos. En el caso de los sulfuros polimetálicos incluso se ha comprobado la existencia vida animal singular previamente desconocida y adaptada a un medio con elevada temperatura y acidez y, aunque no en detalle, sí que se conoce la existencia de importante biodiversidad en las montañas marinas en las que se encuentran las cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto.

Otro aspecto relacionado con la seguridad energética, incluso con la seguridad en general, son los eventos violentos que tienen lugar en el mar, como por ejemplo los actos de piratería o los conflictos bélicos. En este último caso, como ocurrió en las guerras del Golfo, además de a la seguridad energética, afectaron gravemente a la seguridad natural por los efectos ambientales de las acciones sobre las instalaciones petrolíferas.

En lo que respecta al ámbito jurisdiccional existen múltiples situaciones. desde las explotaciones en aguas territoriales o explotaciones en zonas de exclusividad económica de los estados a explotaciones en aguas internacionales. En este sentido, los conflictos de delimitación no son nuevos, pero a medida en que las explotaciones marinas alcancen mayor relevancia cabe la posibilidad del incremento en el número y la intensidad de estos conflictos. En lo que respecta al lecho marino de las aguas internacionales, su gestión corresponde a la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, creada por Naciones Unidas a partir de la Convención del Derecho del Mar de 1982. En caso de conflicto habría que ver la capacidad que tiene este organismo para imponer su autoridad.

4.5. CONCLUSIONES

En términos generales la economía y la sociedad del planeta está mejorando de forma importante, de forma que, por un lado, las economías de los países en desarrollo adquieren mayores grados de industrialización y cada vez más personas en el planeta tienen acceso

a mejores niveles de vida. Esta situación que indudablemente es positiva lleva asociado un aumento en la demanda de recursos minerales y energéticos, por lo que es necesario identificar todas las posibles fuentes de estos recursos para satisfacer de forma sostenible este aumento y la gran extensión del fondo marino con su correspondiente subsuelo es una gran fuente de dichos recursos, que además forme parte de los elementos que aporten seguridad energética. En lo que respecta a los recursos más novedosos es necesario aprovechar este estado inicial de explotación para diseñar sistemas, tecnologías y procesos que permitan una gestión sostenible y compatible con la seguridad natural y en las tecnologías ya consolidadas seguir evaluando los aspectos que pueden amenazar la seguridad natural teniendo en cuenta las lecciones aprendidas de los eventos ocurridos. Finalmente, dado que la mayor parte del océano no forma parte de la jurisdicción de ningún estado y que las delimitaciones marítimas entre estados son en ocasiones fuentes de controversias es necesario estrechar la cooperación internacional con el fin de evitar posibles conflictos.



Tabla 57: Anexo I: Usos y aplicaciones de las materias primas críticas
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de *Royal Society of Chemistry* y de *US Geological Survey* [332], [333], [334], [335], [336], [337], [338]

CRM	USOS
Antimonio	Fabricación de dispositivos semiconductores como detectores de infrarrojos y diodos En aleación con otros metales para mejorar la dureza Se utiliza en baterías aleado con plomo Recubrimiento de cables Fabricación de materiales retardantes de la llama.
Barita	Aditivo en fluidos de perforación de pozos de petróleo y gas natural Se utiliza en la fabricación de pinturas, plásticos y caucho En automoción se usa en pastillas de freno, embragues e imprimación de protección de metales Se utiliza como aditivo del hormigón de alta densidad para la protección contra la radiación en las unidades de rayos x en hospitales, centrales nucleare y centros de investigación En medicina, la barita ultrapura se usa como medio de contraste en radiografías y tomografías del tracto gastrointestinal
Berilio	En aleaciones con cobre y níquel para fabricación de giroscopios, resortes y dispositivos que no produzcan chispas Otras aleaciones se utilizan en aplicaciones militares y aeroespaciales: cazas, misiles, vehículos espaciales y satélites de comunicación En reactores nucleares como regulador de neutrones Litografía de rayos X para la fabricación a nanoescala Otras aplicaciones nucleares y cerámicas por su alto punto de fusión (1287 °C)
Bismuto	En aleaciones con estaño y cadmio en fabricación de detectores de incendios, dispositivos de seguridad de extintores, fusibles eléctricos y soldaduras blandas
Borato	Fabricación de fibra de vidrio, vidrio de borosilicato, jabones y detergentes, aditivo para retardantes de propagación de la llama, tratamiento de la madera y esmaltes
Caucho natural	Usos en fabricación de neumáticos, mangueras, calzado, cajas de baterías, colchones de espuma, globos, juguetes, en la estabilización del suelo, absorción de vibraciones, en la construcción de carreteras y otros productos médicos y de higiene. El caucho natural se usa en la fabricación de más de 40000 productos, generalmente vulcanizados
Cerio	En forma de óxido en convertidores catalíticos y las nanopartículas del óxido se están estudiando como aditivos al diesel para reducción de emisiones en los gases de escape En televisores y lámparas energéticamente eficientes
Cobalto	En la fabricación de imanes. Aleado con aluminio y níquel, los imanes son especialmente potentes Turbinas por su alto punto de fusión En procesos de galvanoplastia para aportar dureza y resistencia a la corrosión
Disprosio	En aleaciones para la fabricación de imanes basados en neodimio utilizados en motores o generadores En forma de óxido y con níquel en barras de control de reactores nucleares

..

CRM	USOS
Erbio	Reducción de la dureza de metales cuando se alea En cables de fibra óptica para amplificar las señales de banda ancha
Escandio	En aleaciones con aluminio para obtener materiales ligeros con alto punto de fusión En forma de yoduro en lámparas de vapor de mercurio para obtener una luz muy similar a la solar Como isótopo escandio-45 como marcador para monitorizar movimientos en el refino de petróleo y en la detección de fugas de tuberías
Europio	En la impresión de moneda (billetes) En lámparas de bajo consumo En barras de control de reactores nucleares Plástico dopado con europio como material láser Fabricación de aleaciones superconductoras
Fluorita	Fabricación de aluminio, gasolina, espumas aislantes, plásticos, refrigerantes, acero y combustible de uranio. En determinadas zonas se añade al agua potable para prevención de la caries
Fosfatos	Fabricación de fertilizantes Alimento para animales Industria alimentaria
Fósforo	Fabricación de fertilizantes Producción de acero
Gadolinio	En aleaciones de hierro y cromo para mejorar la ductilidad, resistencia a altas temperaturas y oxidación En aleaciones para la fabricación de imanes, componentes electrónicos y dispositivos de almacenamiento de datos Sus compuestos se utilizan en la resonancia magnética para el diagnóstico de tumores En el núcleo de reactores nucleares como absorbente de neutrones
Galio	Arseniuro de galio como sustituto del silicio en la industria electrónica. Componente de semiconductores Presente en LED y células fotovoltaicas El nitruro de galio también es semiconductor y se usa en teléfonos móviles, LED (azul y verde) y en sensores de presión en dispositivos táctiles Aleaciones de bajo punto de fusión En aleación en la fabricación de termómetros es sustitución del mercurio
Germanio	Lentes de cámaras, objetivos para microscopios, espectroscopios de infrarrojos
Grafito natural	Revestimiento de frenos, fundiciones y revestimientos para la fundición, lubricantes, aditivos para gasolina, baterías, crisoles, dispositivos eléctricos/electrónicos, diamantes industriales, lápices y producción de grafito

CRM	USOS
	Barras de control de reactores nucleares Electrodos para corte por plasma Componente de aleaciones utilizadas en la industria y en el sector aeroespacial: partes calientes de turbinas y escudos cerámicos en módulos de reentrada espacial En forma de óxido en circuitos integrados como sustituto del silicio Recubrimientos ópticos Tratamientos de radioterapia con nanopartículas de óxido de hafnio en oncología (en investigación) Óxido de hafnio como componente de composites que actúan como reflectores térmicos
Hafnio	
	Atmósfera de protección en la fabricación de fibras ópticas y semiconductores Refrigerante en aplicaciones aeroespaciales Láser de gas helio-neón Microscopios de iones de helio Junto con oxígeno para la creación de atmósferas artificiales para buceadores de aguas profundas Llenado de globos meteorológicos y air-bags
Helio	
	En aleación con osmio para la fabricación de instrumentos de precisión En aleaciones especiales altamente resistentes a la corrosión
Iridio	
	En catalizadores industriales Dispositivos de memoria y láser
Iterbio	
	Aditivo de aleaciones de aluminio y magnesio para aumentar su resistencia Cristal de granate itrio-aluminio: Láser para corte de metales y LED Óxido de itrio: Lentes de cámaras resistentes al calor y a los golpes y fabricación de superconductores Isótopo itrio-90 en tratamiento de algunos tipos de cáncer
Itrio	
	Aleación con níquel para almacenamiento de hidrógeno Ánodo de baterías de coches híbridos Fabricación de lámparas de espectro similar a la luz solar Óxido de lantano: fabricación de vidrios ópticos especiales Catalizadores para el refino de petróleo El ion La3+ es un marcador biológico y el lantano radioactivo ha sido probado para su uso en el tratamiento del cáncer
Lantano	
	Catalizadores para el refino de petróleo
Lutecio	

..

CRM	USOS
Magnesio	En aleación con el aluminio mejora sus características mecánicas y de soldadura en la construcción de coches y aviones Fabricación de elementos ligeros: asientos de coches, ordenadores portátiles, cámaras y herramientas eléctricas Óxido de magnesio: Fertilizantes y ladrillos resistentes al calor Compuestos orgánicos de magnesio (reactivos Grignard): industria química Medicina: Hidróxido de magnesio, sales de Epsom, cloruro y citato
Neodimio	En aleación con hierro y boro para la fabricación de imanes permanentes Junto con el praseodimio para vidrio de didimio: láser quirúrgico, gafas de soldado y soldadura de vidrio, cabinas de bronceado El óxido y el nitrato como catalizadores en reacciones de polimerización
Niobio	En aleaciones donde mejora su resistencia a bajas temperaturas: motores a reacción y cohetes, vigas para edificios y plataformas petrolíferas, oleoductos y gasoductos Imanes superconductores para aceleradores de partículas, escáneres de resonancia magnética y resonancia magnética nuclear Óxido de niobio en lentes correctoras
Paladio	Catalizadores para coches Empastes y coronas dentales Condensadores cerámicos utilizados en electrónica Como catalizador en reacciones de hidrogenación y deshidrogenación
Platino	Catalizadores para vehículos Industria química: producción de ácido nítrico, silicona y benceno Catalizador para mejorar la eficiencia de las células de combustible Fabricación de fibra óptica, turbinas, bujías, marcapasos y empastes dentales Compuestos de platino: tratamientos de quimioterapia
Praseodimio	En aleación con el magnesio tiene gran resistencia y se usa en motores de aviones Aleaciones para imanes permanentes Junto con el neodimio para vidrio de didimio: láser quirúrgico, gafas de soldado y soldadura de vidrio, cabinas de bronceado
Rodio	En catalizadores para coches para la reducción de óxidos de nitrógeno de los gases de escape Industria química: producción de ácido acético, ácido nítrico y reacciones de hidrogenación Recubrimiento de fibra óptica, espejos ópticos, elementos de termopar y reflectores de faros Material para contactos eléctricos
Rutenio	Industria electrónica: Resistencias de chip y contactos eléctricos Recubrimiento de ánodos de células electroquímicas para la producción de cloro y en catalizadores para la producción de amoníaco y ácido acético Células fotovoltaicas
Samario	Aleaciones con platino y paladio para aumentar dureza para la fabricación de contactos eléctricos con fuerte resistencia al desgaste Imanes de samario-cobalto que están siendo sustituidos por los imanes de neodimio Como dopante en cristales de cloruro de calcio en láseres ópticos. Vidrio absorbente de infrarrojos Absorbente de neutrones en reactores nucleares Iluminación de arco de carbono: Iluminación de estudios y proyección

...

CRM	USOS
Silicio metal	Aleaciones con aluminio y hierro en la fabricación de transformadores y generadores, bloques de motor, culatas y máquinas herramientas Semiconductor en dispositivos de estado sólido en electrónica. Láser
Tantalio	Componentes electrónicos: Condensadores de muy pequeño volumen (dispositivos electrónicos portátiles) Aplicaciones quirúrgicas: implantes y otras aplicaciones Equipos para el manejo de materiales corrosivos por su gran resistencia a la corrosión Aleaciones extremadamente fuertes: Turbinas, cohetes y aviones supersónicos
Terbio	Dopante del fluoruro de calcio, tungstato de calcio y molibdato de estroncio en dispositivos electrónicos de estado sólido Lámparas de bajo consumo y de mercurio En rayos x disminuye el tiempo de exposición para obtener la misma imagen Sales de terbio: dispositivos láser Altavoces de superficie plana
Tulio	Equipos de rayos x portátiles para uso médico Láser de aplicaciones quirúrgicas
Vanadio	Aleaciones con acero muy resistentes: Ejes, herramientas, cigüeñales, ... Las aleaciones de vanadio se utilizan en reactores nucleares por su baja absorción de neutrones Óxido de vanadio: producción de imanes superconductor
Wolframio	El tungsteno y sus aleaciones se utilizan en aplicaciones de alta temperatura: electrodos de soldadura por arco y hornos de alta temperatura El carburo de tungsteno es extremadamente duro: corte y taladrado

Tabla 58: Anexo II: Reservas probadas de petróleo - Histórico (miles de millones de barriles) [34]

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
América del Norte	133,7	132,4	133,2	133,0	132,9	131,0	130,7	129,5	127,5	125,4	123,2	122,1	120,5	127,6	126,9	127,3	127,1	100,0	232,8
América Central y del Sur	27,2	32,3	33,4	36,4	62,9	64,6	68,1	69,2	69,5	71,5	74,6	78,8	80,7	81,5	83,7	90,7	93,4	95,6	97,8
Europa	15,8	15,3	16,4	15,8	16,3	16,5	16,3	17,2	16,9	17,5	18,3	19,2	18,6	18,6	20,0	21,4	21,7	21,4	20,7
Comunidad de Estados Independientes	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	61,0	59,0	59,0	58,5	58,4	123,6	123,6	122,6	122,6	121,5	121,5	121,0	121,1	120,1
Oriente Medio	365,3	388,9	396,9	430,8	431,7	537,1	566,6	653,0	661,0	659,6	660,8	661,6	661,9	663,6	663,3	674,0	683,2	685,2	685,8
África	56,3	58,3	58,0	57,8	57,0	58,0	58,7	59,0	59,1	58,7	60,4	61,1	61,2	65,0	72,0	74,9	75,3	77,2	84,7
Asia Pacífico	35,3	35,4	36,7	38,0	38,2	38,8	39,1	39,3	34,0	35,8	38,9	38,6	38,2	38,1	37,9	37,9	39,2	40,8	38,3
Total Mundial	696,5	725,6	737,7	774,6	802,1	907,0	938,5	1026,4	1026,5	1027,0	1099,8	1104,9	1103,6	1116,9	1125,0	1147,6	1161,0	1141,2	1280,2

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
América del Norte	232,1	230,1	228,3	225,3	223,7	223,7	221,7	221,5	216,6	217,8	221,5	225,3	229,3	232,6	237,9	227,5	227,7	237,8	236,7
América Central y del Sur	97,9	100,1	101,7	101,7	104,6	103,3	110,5	123,2	196,0	235,2	321,5	323,1	323,7	325,1	326,8	324,1	324,2	324,0	325,1
Europa	21,0	21,2	19,2	18,8	18,0	17,7	16,1	15,5	14,2	14,0	13,6	13,9	14,2	13,7	12,9	13,9	13,2	13,7	14,3
Comunidad de Estados Independientes	120,1	119,3	123,5	125,2	122,9	121,8	121,5	144,9	144,8	144,0	144,2	144,2	143,9	143,5	141,6	140,8	144,6	144,7	144,7
Oriente Medio	696,7	698,7	741,3	745,7	750,1	755,5	755,9	754,9	753,7	753,1	765,9	797,9	799,3	802,9	803,1	802,9	807,7	834,3	836,1
África	93,0	96,7	101,6	106,2	107,6	111,3	117,2	119,7	120,4	122,6	124,5	124,2	127,0	126,4	125,5	126,3	126,5	125,3	125,3
Asia Pacífico	38,9	40,4	40,6	40,5	43,4	43,4	45,5	45,3	48,0	48,8	50,1	49,0	49,9	49,8	49,5	48,8	47,7	47,7	47,6
Total Mundial	1299,8	1306,4	1356,2	1363,4	1370,1	1376,7	1388,4	1425,0	1493,8	1535,4	1641,5	1677,6	1687,3	1694,1	1697,2	1684,3	1691,6	1727,5	1729,7

Tabla 59: Anexo III. Reservas probadas de gas natural - Histórico (billones (*trillions*) de metros cúbicos) [34]

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
América del Norte	10,0	10,0	10,1	10,2	10,0	9,9	9,7	9,2	9,2	9,2	9,1	9,0	8,5	8,2	8,2	8,2	8,0	7,0	7,0
América Central y del Sur	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	4,4	4,9	5,0	5,1	5,5	5,7	5,7	5,7	6,1	6,3	6,4	6,6	6,8	6,8
Europa	4,1	4,0	4,2	4,1	4,2	4,2	4,9	5,3	5,2	5,2	5,2	5,3	5,2	5,1	5,1	5,2	5,6	5,6	5,6
Comunidad de Estados Independientes	21,7	22,4	23,0	24,0	25,6	26,2	26,7	27,2	33,3	34,9	36,3	37,1	38,1	38,4	37,8	37,4	39,5	39,2	39,1
Oriente Medio	24,3	25,2	25,7	26,7	27,0	29,6	30,4	33,4	36,7	36,8	41,4	42,6	43,0	44,1	44,0	47,7	47,9	51,5	53,0
África	5,7	6,0	6,0	6,0	5,9	7,1	7,1	7,4	8,1	8,2	9,1	9,5	9,6	8,7	9,5	9,7	10,2	10,3	11,0
Asia Pacífico	5,1	5,7	5,8	6,5	6,9	7,6	7,9	8,0	8,5	9,0	8,3	8,7	9,1	9,5	9,6	9,2	9,4	10,5	10,8
Total Mundial	74,0	76,4	78,1	80,8	83,1	89,0	91,5	95,4	106,1	108,8	115,0	117,8	119,2	120,1	120,6	123,7	127,2	130,8	133,4

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
América del Norte	7,2	7,4	7,1	7,1	7,2	7,5	7,7	8,4	8,7	9,4	10,5	11,2	10,6	11,4	12,2	10,7	10,9	14,1	13,9
América Central y del Sur	6,8	6,9	6,8	6,7	6,8	6,7	7,2	7,4	7,5	7,6	8,1	8,1	8,3	8,2	8,2	8,3	8,3	8,2	8,2
Europa	5,5	6,3	6,1	6,2	6,0	6,2	5,9	5,8	5,5	5,3	5,1	4,6	4,8	4,7	4,4	4,3	4,0	3,9	3,9
Comunidad de Estados Independientes	39,4	39,6	40,2	40,1	39,9	40,1	40,1	40,2	45,9	45,8	49,0	57,6	57,4	57,8	58,2	58,1	57,9	62,0	62,8
Oriente Medio	57,4	69,6	70,4	70,9	70,9	71,3	71,3	72,6	73,7	73,6	76,8	77,8	77,4	77,7	77,6	77,0	77,6	75,3	75,5
África	11,9	12,6	13,2	13,3	13,6	13,5	13,7	14,0	14,0	14,1	14,0	14,0	13,8	13,5	14,0	13,9	14,3	14,4	14,4
Asia Pacífico	139,4	153,8	155,3	156,0	156,6	157,4	158,4	161,9	170,2	171,0	178,5	188,6	187,7	189,2	190,4	188,6	190,7	196,1	196,9
Total Mundial	139,4	153,8	155,3	156,0	156,6	157,4	158,4	161,9	170,2	171,0	178,5	188,6	187,7	189,2	190,4	188,6	190,7	196,1	196,9

Tabla 60: Anexo IV: Listado de permisos y concesiones en España [251]

PERMISOS DE INVESTIGACIÓN VIGENTES A.G.E.			
Operador	Empresas	Participación %	Permisos
SHESA	SHESA / PETRICHOR / CAMBRIA	44 / 36 / 20	ANGOSTO-1
FRONTERA ENERGY CORPORATION, S.L.	FRONTERA ENERGY CORPORATION, S.L.	100	AQUILES
INVEXTA RECURSOS S.L.	INVEXTA RECURSOS S.L.	100	ARIES2
PETROLEUM	PETROLEUM OIL & GAS España, S.A. / RIPSAs / PYRENEES Energy Spain, S.A.	50 / 40 / 10	BEZANA
PETROLEUM	PETROLEUM OIL & GAS España, S.A. / RIPSAs / PYRENEES Energy Spain, S.A.	50 / 40 / 10	BIGÜENZO
Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	CAMEROS-2
FRONTERA ENERGY CORPORATION, S.L.	FRONTERA ENERGY CORPORATION, S.L.	100	CRONOS
Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	EBRO-A
Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	EBRO-B
Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	EBRO-C
Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	EBRO-D
Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi S.A.	Unión Fenosa Gas Exploración y Producción, S.A. / SHESA / Oil & Gas Skills, S.A.	58,80 / 37,70 / 3,51	EBRO-E
RIPSAs	RIPSAs -SHESA	69,23 / 30,77	FULMAR
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	LEO
RIPSAs	RIPSAs	100	LUBINA-1
RIPSAs	RIPSAs	100	LUBINA-2
RIPSAs	RIPSAs	100	LUENA
RIPSAs	RIPSAs / PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA, S.A.	60 / 40	SIROCO-A
RIPSAs	RIPSAs / PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA, S.A.	60 / 40	SIROCO-B
RIPSAs	RIPSAs / PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA, S.A.	60 / 40	SIROCO-C
RIPSAs	RIPSAs / PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA, S.A.	60 / 40	SIROCO-D
BNK SEDANO HIDROCARBUROS, S.L.U.	BNK SEDANO HIDROCARBUROS, S.L.U.	100	URRACA
PERMISOS DE INVESTIGACIÓN SUSPENDIDOS A.G.E.			
PETROLEUM	PETROLEUM	100	EL JUNCAL
SHESA	SHESA / PETRICHOR / CAMBRIA	44 / 36 / 20	ENARA
SHESA	SHESA / PETRICHOR / CAMBRIA	44 / 36 / 20	USOA
SHESA	SHESA / PETRICHOR / CAMBRIA	44 / 36 / 20	MIRUA
SHESA	SHESA / PETRICHOR / CAMBRIA	44 / 36 / 20	USAPAL
Schuepbach Energy	Schuepbach Energy / Vancast Exploración	85 / 15	TESORILLO
Schuepbach Energy	Schuepbach Energy / Vancast Exploración	85 / 15	RUEDALABOLA
PERMISOS DE INVESTIGACIÓN SOLICITADOS A.G.E.			
Operador	Empresas	Participación %	Permisos
Oil and Gas Capital, S.L.	Oil and Gas Capital, S.L.	100	CUÉLEBRE-1
Oil and Gas Capital, S.L.	Oil and Gas Capital, S.L.	100	CUÉLEBRE-2
PETROLEUM	PETROLEUM OIL & GAS España, S.A.	100	LOS BASUCOS
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 1
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 2
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 3
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 4
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 5
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 6
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 7
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 8
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 9
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 10
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 11
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN SPAIN LTD.	100	NORDESTE 12
Oil and Gas Capital, S.L.	Oil and Gas Capital, S.L.	100	POLIFEMO
RIPSAs	RIPSAs/CNW/L/PETROLEUM OIL&GAS/CEPSA EP	68,67/14,47/9,46/7,39	MEDUSA
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN/SHELL	50/50	MESANA 1
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN/SHELL	50/50	MESANA 2
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN/SHELL	50/50	MESANA 3
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN/SHELL	50/50	MESANA 4
CAPRICORN SPAIN LTD.	CAPRICORN/SHELL	50/50	MESANA 5

PERMISOS DE INVESTIGACIÓN VIGENTES CCAA			
Operador	Empresas	Participación %	Permisos
COMPAÑÍA PETROLÍFERA DE SEDANO, S.L.	COMPAÑÍA PETROLÍFERA DE SEDANO, S.L.	100	BASCONCILLOS H
CBM RECURSOS ENERGÉTICOS	CBM RECURSOS ENERGÉTICOS	100	BOÑAR-CISTERNA
PYRENEES ENERGY SPAIN	PYRENEES ENERGY SPAIN	100	CARLOTA
OIL & GAS CAPITAL, SL	OIL & GAS CAPITAL, SL	100	ESCORPIO
COMPAÑÍA PETROLÍFERA DE SEDANO, S.L.	COMPAÑÍA PETROLÍFERA DE SEDANO	100	HUERMECES
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	100	LES PINASSES
OIL & GAS CAPITAL, SL	OIL & GAS CAPITAL, SL	100	PENÉLOPE
ENAGAS	ENAGAS	100	REUS
SHESA	SHESA	100	SAIA
BNK HIDROCARBUROS S.L.U.	BNK HIDROCARBUROS S.L.U.	100	SEDANO
OIL & GAS CAPITAL, SL	OIL & GAS CAPITAL, SL	100	ULISES-2
OIL & GAS CAPITAL, SL	OIL & GAS CAPITAL, SL	100	ULISES-3
HUNOSA	HUNOSA/VOLTA ENERGY	70/30	LLABANA-1
PERMISOS DE INVESTIGACIÓN SOLICITADOS CCAA			
Operador	Empresas	Participación %	Permisos
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	ACUARIO
EXPLOR. REC. NATU. GEOLÓGICOS,S.A.	EXPLOR. REC. NATU. GEOLÓGICOS,S.A.	100	BURGOS 5
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	HIMILCE 1
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	HIMILCE 2
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	HIMILCE 3
PETROLEUM	PETROLEUM	100	JUNCAL ESTE
SHESA / Petrichor Euskadi	SHESA / Petrichor Euskadi	50 / 50	LANDARRE
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	LOLA 1
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	LOLA 2
SHESA / Petrichor Euskadi	SHESA / Petrichor Euskadi	50 / 50	LORE
SHESA / Petrichor Euskadi	SHESA / Petrichor Euskadi	50 / 50	LURRA
OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	OIL AND GAS CAPITAL, S.L.	100	PENÉLOPE ESTE
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	100	ROMERAL ESTE
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	100	ROMERAL SUR
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA	100	SEVILLA SUR
SHESA / Petrichor Euskadi	SHESA / Petrichor Euskadi	50 / 50	SUSTRAIA

CONCESIONES DE EXPLOTACIÓN VIGENTES			
Operador	Empresas	Participación %	Permisos
RIPSA	RIPSA / MURPHY	82 / 18	ALBATROS
RIPSA	RIPSA / CNWL	53,85 / 46,15	ANGULA
RIPSA	RIPSA / PETROLEUM / CNWL / CEPSA EP	67,35 / 7,50 / 17,65 / 7,50	CASABLANCA
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	EL ROMERAL 1
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	EL ROMERAL 2
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	EL ROMERAL 3
NUEL GAS	NUEL GAS	100	EL RUEDO-1
NUEL GAS	NUEL GAS	100	EL RUEDO-2
NUEL GAS	NUEL GAS	100	EL RUEDO-3
RIPSA	RIPSA / MURPHY	82 / 18	GAVIOTA I
RIPSA	RIPSA / MURPHY	82 / 18	GAVIOTA II
NUEL GAS	NUEL GAS	100	LAS BARRERAS
COMPañIA PETROLÍFERA DE SEDANO	COMPañIA PETROLÍFERA DE SEDANO	100	LORA
RIPSA	RIPSA	100	LUBINA
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	MARISMAS A
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	MARISMAS B-1
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	MARISMAS C-1
PETROLEUM	PETROLEUM / NUEL GAS / EASTERN	75 / 15 / 10	MARISMAS C-2
RIPSA	PETROLEUM / RIPSA / CEPSA EP / CNWL	17,06 / 72,44 / 7,00 / 3,50	MONTANAZO D
RIPSA	RIPSA	100	POSEIDON NORTE
RIPSA	RIPSA	100	POSEIDON SUR
PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	PETROLEUM OIL & GAS ESPAÑA S.A.	100	REBUJENA
RIPSA	RIPSA / CNWL / CEPSA EP / PETROLEUM	65,42 / 15,58 / 15,00 / 4,00	RODABALLO
UNION FENOSA GAS E&P	UFG E&P/SHESA/OGS	58,79/37,69/3,51	VIURA

CONCESIONES DE ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO			
Operador	Empresas	Participación %	Nombre
ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	100	GAVIOTA
Gas Natural Almacenamiento Andalucía, S.A	Gas Natural Almacenamiento Andalucía, S.A	100	MARISMAS
ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	100	SERRABLO
ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	100	YELA
ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U	100	CASTOR *

* Ver: Real Decreto-ley 13/2014, de 3 de octubre

5. CAPTURA Y UTILIZACIÓN DE CO₂

5.1. INTRODUCCIÓN

El CO₂ es una sustancia que a presión y temperatura atmosférica se encuentra en estado gaseoso, presentándose como un gas incoloro, insípido e inodoro.

El CO₂ está presente en el ciclo del carbono, mediante el cual el carbono existente en el planeta se intercambia entre la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera y la biosfera mediante procesos biológicos, geológicos y químicos (Figura 114).

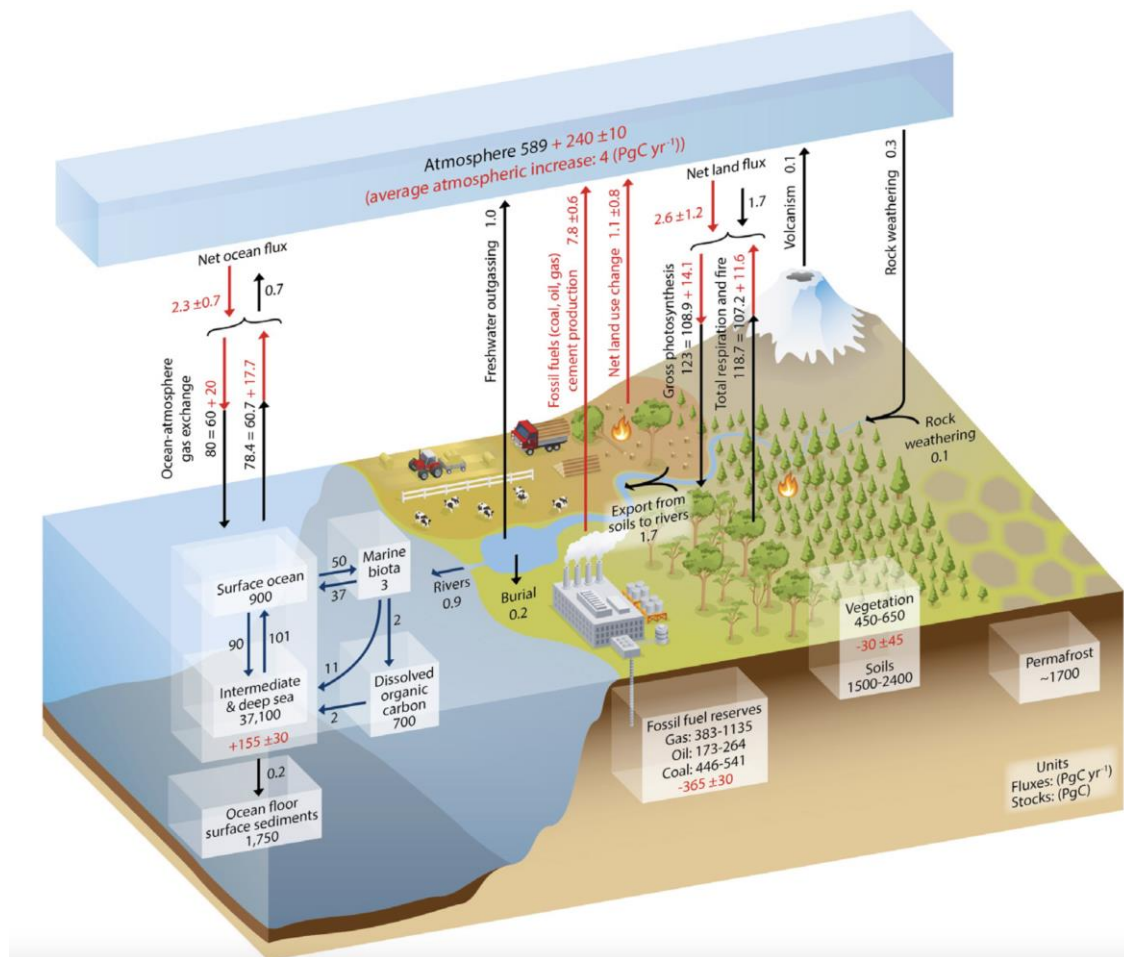


Figura 114: Ilustración simplificada del Ciclo Global del Carbono [339]

La combustión de combustibles fósiles supone una intervención antropogénica en el ciclo ya que dicha combustión supone un rápido e intenso traslado del carbono presente en los combustibles fósiles presentes en la litosfera a la atmósfera en forma de CO₂ y el ciclo del carbono no es capaz de mantener constante la presencia del CO₂ en la atmósfera por lo que se produce una sobrepresencia de dicho gas. La presencia del CO₂, junto con otros gases, en la atmósfera produce un efecto invernadero que dificulta la salida de

radiación a través de la atmósfera lo que permite la existencia de temperaturas en la tierra que permiten la vida en ella. Sin embargo, el exceso de CO₂ emitido por la actividad humana incrementa este efecto invernadero y actualmente existe un importante consenso científico, político y social en que este incremento del efecto invernadero está causando un calentamiento global en el planeta y un cambio climático asociado a dicho calentamiento global. Este aumento del CO₂ atmosférico supone que de las 280 ppm existentes en la época preindustrial ha pasado a más de 400 ppm en los últimos años [339]. La medición realizada por la NASA era en enero de 2020 de 413 ppm [340].

La reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera pasa tanto por la reducción de las emisiones como por estrategias que mitiguen las que sea imposible eliminar. Entre estas estrategias de mitigación se encuentra el almacenamiento del CO₂ generado (CCS, *Carbon Capture and Storage*) y la utilización de dicho CO₂ generado en otros procesos productivos (CCU, *Carbon Capture and Use*). En el caso del almacenamiento del CO₂ existen importantes aspectos económicos y técnicos que limitan su desarrollo. Por un lado, el almacenamiento en sí mismo no es una actividad productiva para el que tiene que costearlo ya que no va a percibir ningún beneficio por ello, por lo que, en caso de tener que realizarlo pasaría a formar parte de la estructura de costes de su actividad. Este coste no sería un aspecto menor ya que en la actualidad el almacenamiento es un proceso costoso. Por el momento no hay incentivos económicos específicos para llevarlo a cabo, por lo que tendrían que encuadrarse en los establecidos con carácter general para las actuaciones ambientales de las empresas. Pero los retos no son solo económicos. Desde el punto de vista técnico todavía hay dudas acerca de las posibles fugas y también desde el punto de vista de la ubicación del almacenamiento este puede no ser posible en todos los países debido a las condiciones geológicas.

Frente a la situación improductiva del gas en el almacenamiento, las tecnologías de utilización del CO₂ se centran en valorizar un residuo muy perjudicial transformándolo en un producto que puede ser vendido y, por lo tanto, del que se puede obtener beneficios. En contra, la utilización del CO₂ requiere gran aporte de energía debido a la estabilidad de la molécula. En la Figura 115 vemos la evolución de las emisiones de CO₂ en diferentes áreas del mundo. Podemos ver que en las zonas desarrolladas (Europa y Norte América) las emisiones se vienen reduciendo desde su valor más alto alcanzado en 2007. Sin embargo, las emisiones en Asia no solo no han dejado de crecer, sino que a partir del año 2002 los aumentos en el crecimiento han sido muy elevados. Evidentemente buena parte de las emisiones que tienen lugar en Asia son para la producción de bienes y servicios en Asia, pero también es verdad que otra buena parte es para la producción de bienes y servicios para la zonas desarrolladas, lo que llevaría a la pregunta de si la medición de las emisiones de CO₂ en donde tienen lugar es un parámetro que mide de forma adecuada la adaptación de una sociedad hacia un modelo de sostenibilidad o si no sería más adecuado evaluar las emisiones de CO₂ en un determinado ámbito por el dióxido de carbono emitido por los productos y servicios que consume, independientemente del territorio donde tengan lugar esas emisiones. Esto último también llevaría a pensar si los objetivos de la Unión Europea en materia de cambio climático definen de forma adecuada un modelo de sostenibilidad. En lo que respecta a España, desde el pico alcanzado en 2007 y una reducción en los años posteriores a partir de 2013 se aprecia una estabilización, incluso con un ligero aumento. Sin embargo, la estabilización desde mediados de los años 90 y el posterior descenso en el conjunto de la Unión Europea hace que el porcentaje que supone España en las emisiones de la Unión haya crecido a lo largo de los años de forma muy significativa, alcanzando en 2018 el 8,48% de las emisiones totales de la UE.

5.2. LA CAPTURA Y UTILIZACIÓN DEL CO₂

La captura y utilización del CO₂, CCU (*Carbon Capture and Utilization*) es un conjunto de tecnologías, procesos y productos finales mediante los cuales se captura el dióxido de carbono de los gases de combustión de procesos industriales y del CO₂ presente en la atmósfera y se utiliza en procesos de los que se van a obtener productos utilizables a su vez en otros procesos, evitando o reduciendo así la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

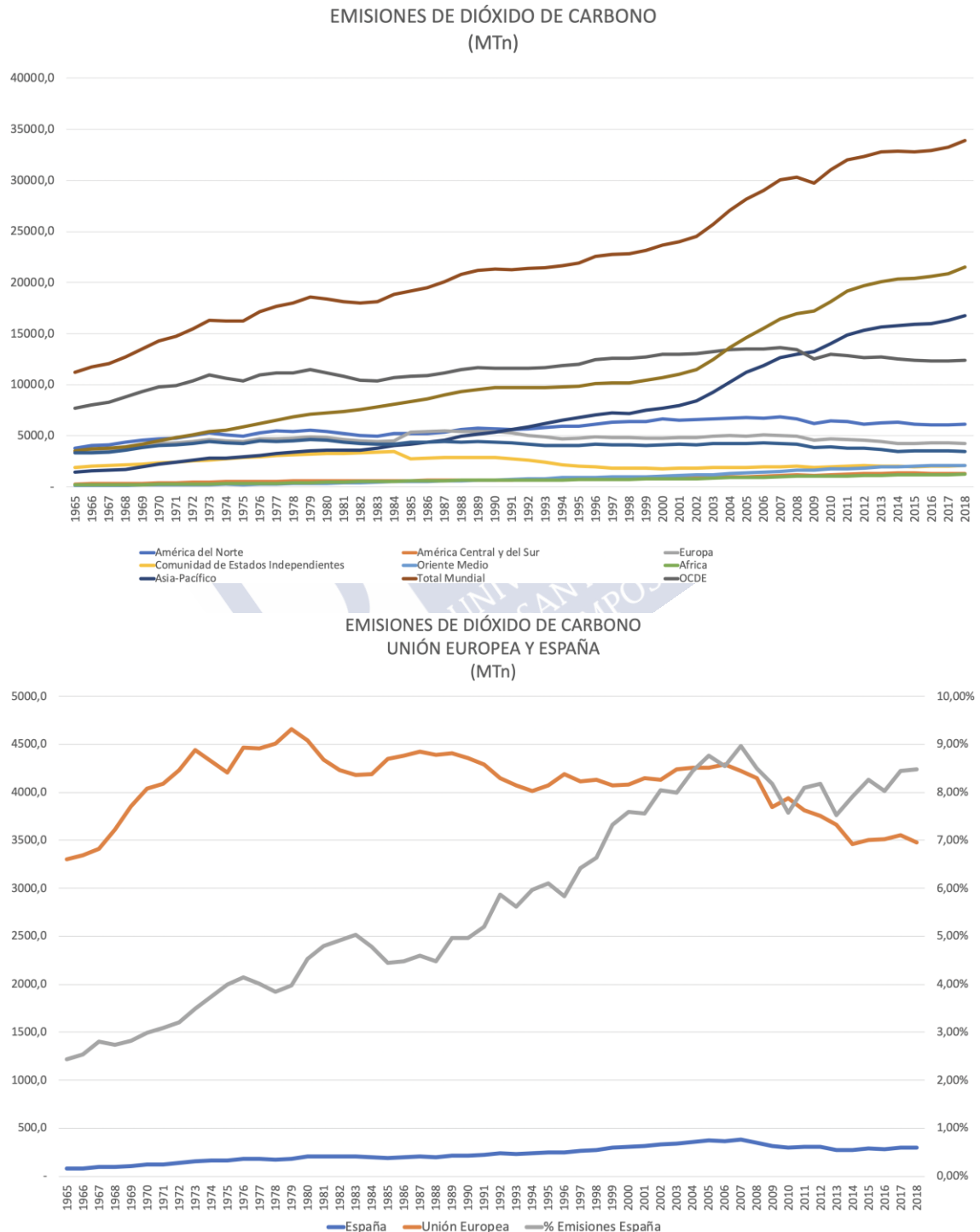


Figura 115: Emisiones de CO₂ 1965-2018. Total mundial, por regiones, España y % España vs UE
Elaboración propia a partir de [34]

La última parte de la definición anterior es el aspecto fundamental por el que una determinada utilización del dióxido de carbono pueda ser exitosa en lo que respecta a la mitigación del efecto invernadero. El CO_2 se utiliza desde hace tiempo en muchos procesos, pero tanto el origen del dióxido de carbono utilizado como el tiempo de retención del gas por la utilización hacen que no exista efecto mitigador o que este no sea relevante. Es decir, el aspecto fundamental es el balance de CO_2 durante el ciclo de vida de una utilización concreta, de forma que el efecto mitigador sería relevante a partir de un balance neutro entre el CO_2 emitido y el CO_2 utilizado por el proceso. Una visión un poco más amplia de mitigación sería una utilización que, aunque siguiera generando emisiones, disminuyera sustancialmente las que genera el proceso en uso para el que se propone su sustitución. En la Figura 116 se propone una clasificación del grado de mitigación de los procesos de utilización del CO_2 de mayor a menor efecto mitigador. En el caso de emisiones negativas, el CO_2 utilizado es mayor que el CO_2 emitido durante el proceso de utilización, es decir, de alguna manera tiene lugar un secuestro o almacenamiento del gas. En el caso de las emisiones neutras el CO_2 utilizado sería el mismo que el CO_2 emitido durante el proceso. En esta situación cabría una distinción en función del tiempo en el que se tarda en liberar el CO_2 con el que se ha obtenido el producto. En este sentido podríamos distinguir entre combustibles con tiempos que van de semanas a pocos meses y otros productos como polímeros que pueden tardar décadas en liberar el dióxido de carbono. Por último, en el caso de las emisiones reducidas hay un balance positivo entre el CO_2 emitido durante la utilización y el CO_2 utilizado, pero este balance supone una cantidad sustancialmente inferior a las emisiones que tienen lugar en los procesos existentes. En cualquier caso, las emisiones a considerar no serían únicamente las del conjunto tecnología-proceso-producto de forma aislada, sino que un análisis preciso requeriría de una evaluación de las emisiones durante todo el ciclo de vida del conjunto, por lo que uno que a primera vista pudiese ser identificado como de un determinado grado de mitigación al evaluar las emisiones correspondientes a todo el ciclo de vida podría tener en realidad un grado de mitigación inferior.

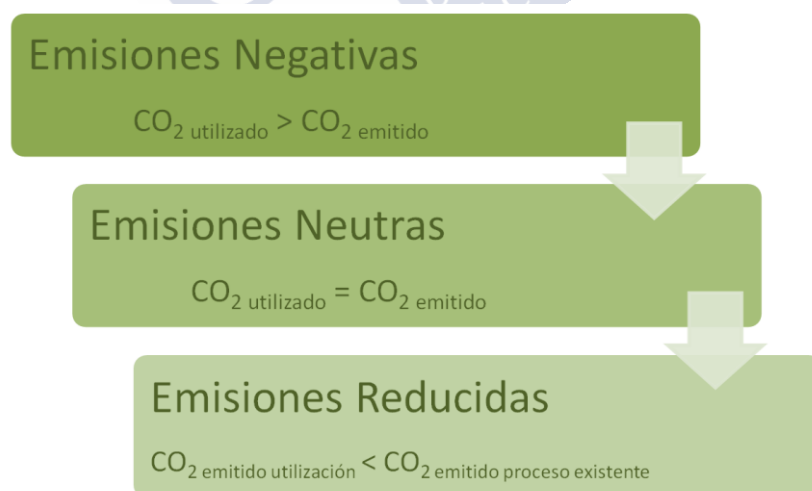


Figura 116: Grados de mitigación de la utilización del CO_2 (elaboración propia)

Aunque la principal ventaja que proporciona la captura y utilización del CO_2 es su efecto mitigador de las emisiones de gases de efecto invernadero, se pueden destacar también otros efectos positivos. Una vez establecida la necesidad de la captura del CO_2 , este puede servir como fuente de carbono que sustituya a otras más costosas tanto desde el punto de vista económico como ambiental [341]. Además, la diversidad de fuentes de

carbono puede contribuir al mantenimiento o incluso a la disminución del precio de esta materia prima. Como veremos más adelante, los procesos CCU pueden integrar la utilización de residuos, entre ellos el propio CO₂, el uso de energías renovables y la obtención de productos con reducción o eliminación de determinados elementos contaminantes constituyendo un claro ejemplo de economía circular. Precisamente en el ámbito energético está uno de los principales desafíos de los procesos CCU ya que sus requerimientos energéticos son, en general, muy elevados. De ahí la necesidad de integración de las energías renovables en los procesos para hacerlos ambientalmente viables. Otro aspecto que puede frenar el desarrollo de la captura y utilización del CO₂ son los elevados niveles de inversión necesarios para el establecimiento de las instalaciones necesarias.

En la actualidad la captura y utilización del CO₂ es una de las diez acciones claves del Plan Estratégico de Tecnología Energética de la Comisión Europea [342], aunque focalizado en mayor medida en el almacenamiento al considerar que la utilización requerirá un más tiempo para su implementación [343]. Esto, unido a las inversiones necesarias para la construcción de plantas e instalaciones hacen que todavía se prevean bajos niveles de utilización de dióxido de carbono procedente de la captura. Sin embargo, tampoco existe todavía una metodología que de alguna forma permita evaluar la mitigación en la captura y utilización del CO₂. El desarrollo de una metodología que sistematice el potencial de mitigación de una tecnología de utilización es una de las recomendaciones que proporciona el Grupo de Asesores Científicos Principales realiza a la Comisión Europea dentro del marco del Mecanismo de Asesoramiento Científico de la Comisión (Figura 117) [344].



Figura 117: Propuesta de metodología de cálculo de mitigación de una tecnología CCU
Adaptado de [344]

5.2.1. Políticas y marco legal de la captura y utilización de CO₂

De forma general, las políticas y la legislación relacionadas con el cambio climático parten de las generadas a nivel europeo que se basan en tres líneas de actuación: la reducción de gases de efecto invernadero, el progresivo aumento del consumo de energía procedente de fuentes renovables y el incremento en la eficiencia energética [345]. Con respecto a los tres primeros parámetros hay dos hitos fijados: el ya inmediato 2020 (para el que se establece una reducción del 20% en la emisión de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990, un consumo total de energía procedente de fuentes

renovables del 20% y un incremento de la eficiencia energética de un 20%, según lo indicado el paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020 [346], [347], [348], [349] y 2030 [350] (en el que se debe haber reducido la emisión de gases de efecto invernadero en un 40% respecto a los niveles de 1990, la energía consumida debe proceder de fuentes renovables en un 27%, y un incremento de la eficiencia energética de un 27%). Para la reducción de gases de efecto invernadero hay ya un tercer hito en 2050 [351] donde se deberían haber reducido la emisión de gases de efecto invernadero entre un 80% y un 95% respecto a los niveles de 1990. La hoja de ruta de 2050 establece a su vez hitos intermedios del 40% en 2030 y del 60% en 2040. Estos objetivos se resumen en la Tabla 62.

Tabla 61: Diferente terminología relacionada con la captura y utilización de CO₂

CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>	IPCC
CAC	Captura y Almacenamiento de Carbono	
CCUS	<i>Carbon Capture, Use and Storage</i>	https://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/climate-change/carbon-capture-use-and-storage.html
PCC	<i>Post-combustion CO₂ capture</i>	Wang, M. et al. [352]
CCU	<i>Carbon Capture and Use</i>	
BECCS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i>	International Energy Agency. <i>Technology Roadmap. Carbon capture and storage.</i>
ACT	<i>Accelerated Carbonation Technology</i>	http://c8s.co.uk
CCC	<i>Carbon Capture and Concentration</i>	<i>Carbon Capture and Storage/Utilization. Singapore perspectives.</i> https://www.nccs.gov.sg/docs/default-source/default-document-library/carbon-capture-and-storage-utilisation-singapore-perspectives.pdf
CCR	<i>Carbon Capture and Reuse</i>	European Commission. <i>SETIS (Strategic Energy Technologies Information System).</i> https://setis.ec.europa.eu/system/files/setis-magazine_11_ccus_final.pdf
CDR	<i>Carbon Dioxide Removal</i>	IPCC SPECIAL REPORT: GLOBAL WARMING OF 1.5 °C https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter4_Low_Res.pdf
DACCS	<i>Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage</i>	IPCC SPECIAL REPORT: GLOBAL WARMING OF 1.5 °C https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter4_Low_Res.pdf
DAC	<i>Direct Air Capture</i>	
NET	<i>Negative Emissions Technologies</i>	https://www.odi.org/blogs/10714-direct-air-capture-can-sucking-co2-atmosphere-really-solve-climate-change
SCS	<i>Soil Carbon Sequestration</i>	IPCC

Tabla 62: Objetivos de la Unión Europea [353]

	2020	2030	2030 Actualiz. (paquete Invierno)	2050
Reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990	20%	40%	40%	80-95%
Consumo total de energía procedente de energías renovables	20%	27%	32%	
Incremento de la eficiencia energética	20%	27%	32,5%	

Además de los textos anteriores, la Comunicación de la Comisión para la economía circular [354] menciona expresamente la reutilización de los efluentes gaseosos y menciona de forma particular el CO₂. A nivel del Estado, se ha definido el Marco Estratégico de Energía y Clima [108] formado por tres documentos: Anteproyecto de Ley de Cambio Climático [355], el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [356] y la Estrategia de Transición Justa [111]. El anteproyecto de Ley de Cambio Climático tiene como objetivo el cumplimiento del Acuerdo de París de 2015 y facilitar la descarbonización de la economía. Para ello establece los objetivos indicados en la Tabla 63.

Tabla 63: Objetivos del anteproyecto de Ley de Cambio Climático [355]

	2030	2050
Reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990	20%	90%
Consumo total de energía procedente de energías renovables	35%	
Generación eléctrica a partir de energías con origen renovable	70%	100%
Incremento de la eficiencia energética (disminución del consumo de energía primaria)	35%	

Por su parte, el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 establece objetivos más ambiciosos que el borrador de la Ley de Cambio Climático que se resumen en la Tabla 64.

Tabla 64: Objetivos del borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [356]

	2030	2050
Reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990	21%	90%
Consumo total de energía procedente de energías renovables	42%	
Generación eléctrica a partir de energías con origen renovable	74%	100%
Incremento de la eficiencia energética (disminución del consumo de energía primaria)	39,6%	

Este plan prevé unas inversiones de 236.124 M€ entre 2021 y 2030 (Figura 118) siendo más de 195.000 M€ inversión adicional respecto al que correspondería si se siguiese la tendencia de la situación actual. La inversión privada supondría un 80% y el 20% sería inversión pública y se conseguirían 364.000 empleos adicionales en 2030. El borrador del Plan espera unos ahorros acumulados entre 2021 y 2030 en importaciones de combustibles fósiles de más de 75.000 M€.

Por último, la Estrategia de Transición Justa pretende maximizar los beneficios de la transición ecológica y minimizar sus posibles perjuicios, sobre todo en materia de empleo y posibles efectos territoriales estableciendo medidas contra la despoblación.

Otras normativas y acuerdos de referencia a nivel internacional son:

- La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992.
- El Acuerdo de París de 2015 (COP21).
- La Resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas sobre Objetivos de Desarrollo Sostenible de 2015.
- Cumbre del Cambio Climático de Katowice de 2018 (COP24).

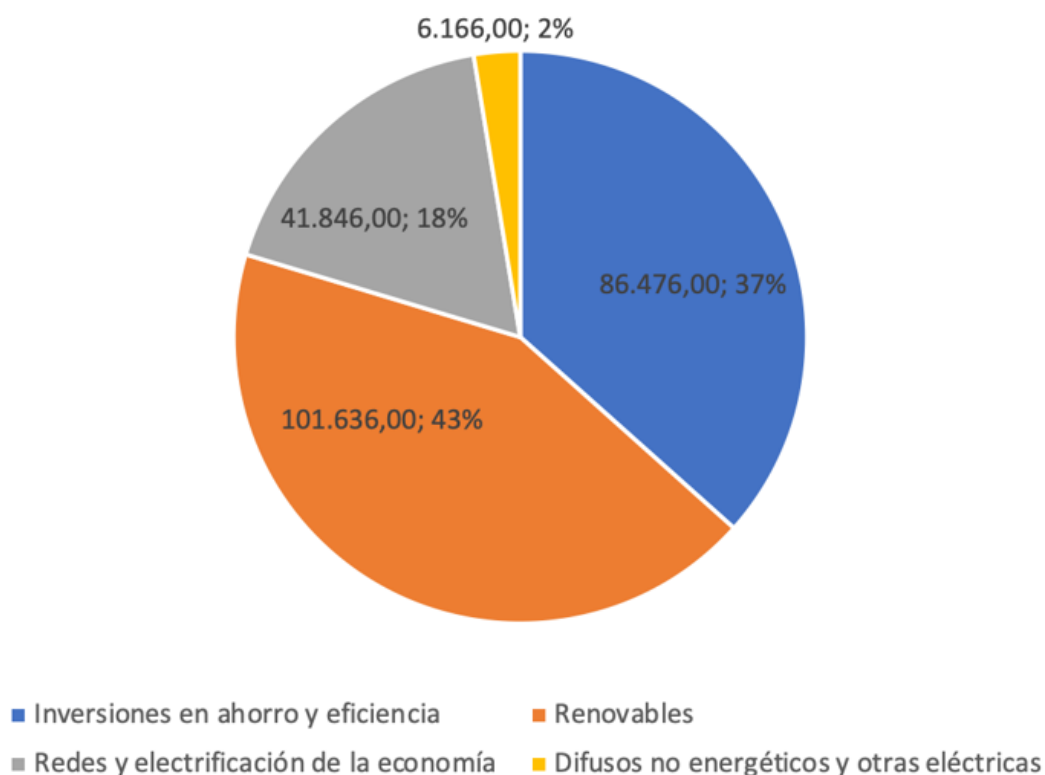


Figura 118: Inversiones previstas en el borrador del Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), en millones de euros
Elaboración propia a partir de [356]

5.2.2. Tecnologías de Captura de CO₂

Actualmente para la captura del CO₂ existen cuatro opciones con alto grado de madurez técnica y la última de ellas todavía en estado muy inicial.

- Captura post-conversión en la que el CO₂ se separa de los gases de desecho de un determinado proceso como la combustión de combustibles fósiles (en este caso particular a esta opción también se la denomina poscombustión).
- Captura pre-conversión en la que se separa CO₂ que es un subproducto no deseado de una reacción intermedia de un proceso de conversión. Esto sucede, por ejemplo, en la producción de amoníaco.
- Captura por combustión oxy-fuel, utilizado exclusivamente en procesos en los que se produce una combustión. Esta se realiza con oxígeno puro de forma que los gases de combustión tienen una alta concentración de CO₂, sin nitrógeno ni sus compuestos lo que evita la necesidad de separación del CO₂.
- Bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ (*Bioenergy and Carbon Capture and Storage* - BECCS)
- Captura de CO₂ directamente del aire (*Direct Air Capture* – DAC)

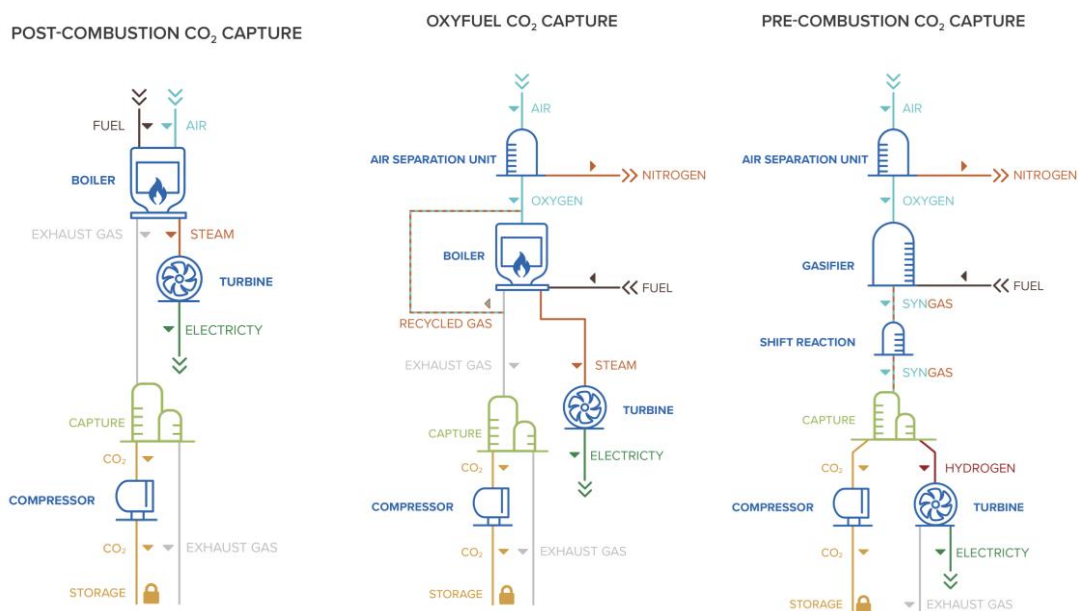


Figura 119: Representación esquemática de algunas tecnologías de captura de CO₂ - *Global CCS Institute* [357]

5.2.2.1. Captura post-conversión

En la captura post-conversión la captura del CO₂ se realiza una vez que se ha llevado a cabo el proceso que genera el CO₂. Uno de los procesos comunes es en el que se produce una combustión y en estos casos la captura también se denomina poscombustión.

Uno de los métodos más maduros de captura es mediante absorción química utilizando disolventes basados en aminas, principalmente monoetanolamina (2-aminoetanol) o MEA (C₂H₇NO), aunque PR también se utiliza dietanolamina, DEA, (C₄H₁₁NO₂) y otras aminas como KS-1. Esta relativa madurez tecnológica le confiere una ventaja competitiva respecto a otras tecnologías, además de ser un proceso tecnológico que puede ser adaptado fácilmente a instalaciones industriales [358] que son grandes productoras de CO₂.

El proceso consiste en hacer pasar los gases de combustión por un disolvente de los indicados anteriormente que absorbe el CO₂, de forma que los gases entran por la parte inferior de la columna de absorción y fluyen hacia arriba a contraflujo del disolvente que fluye hacia abajo, absorbiéndose parte del CO₂ en el disolvente [359]. De la columna de absorción sale una disolución rica (*rich solution*). El disolvente se regenera por desorción. La disolución rica pasa a la parte superior de la columna de desorción (*stripper*) en la que también tiene lugar un contraflujo entre la disolución rica, que fluye hacia abajo, y el vapor generado en la caldera de la columna de desorción (o un recalentador en el caso de que el proceso productivo disponga de vapor que pueda ser usado) que fluye hacia la parte superior. El calor del vapor rompe los enlaces químicos entre el CO₂ y el disolvente y el CO₂ es arrastrado por el flujo del vapor hacia la parte superior de la columna de desorción, donde el vapor se condensa y vuelve hacia abajo en la columna de desorción, mientras que en la parte superior de la columna queda un producto con una pureza del CO₂ del 99% [359] y se comprime para su almacenamiento, mientras que el disolvente regenerado retorna a la columna de absorción para repetir el proceso [352]. El proceso de desorción requiere, por tanto, de la aportación de calor, lo que implica unas importantes necesidades energéticas. Por otra parte, el disolvente ya sin el CO₂ (*lean solution*) es bombeado de vuelta a la parte superior de la columna de absorción. Como en este momento el

disolvente está a una temperatura elevada se hace pasar por un intercambiador de calor que aumenta la temperatura de la disolución rica que va camino de la columna de absorción, de forma que posteriormente reduzca en alguna medida las necesidades energéticas en la columna de desorción.

A partir de esta configuración básica se puede añadir equipamiento como intercambiadores de calor, compresores, etc... así como modificar el proceso añadiendo diferentes niveles de presión durante la destilación para obtener mejoras en la demanda energética de la captura de CO₂.

Modificando el proceso convencional mediante *absorber intercooling* se disminuye la cantidad de disolvente circulando, resultando en una disminución en el tamaño de la instalación [360], pero no tiene un efecto importante a nivel de demanda energética utilizando MEA como disolvente, sin embargo se obtienen reducciones de un 7% en las necesidades energéticas del recalentador de la columna de desorción al utilizar como disolvente una mezcla de AMP (aminometilpropanol) y PZ (piperazina) [359]. Si la modificación se realiza mediante *condensate heating* la energía suministrada al recalentador puede ser recuperada precalentando el condensado con la corriente superior de la columna de destilación. Esta última configuración puede ser mejorada evaporando el condensado en lugar de calentarlo (*condensate evaporation*). Se pueden reducir las necesidades de vapor fuera del propio ciclo obteniendo calor resultado de la compresión del vapor de la columna de destilación de 2 a 5 veces mediante agua inyectada (*stripper overhead compression*). Una columna de destilación multipresión (*multi-pressure stripping*) puede reducir tanto el consumo de vapor tanto en el recalentador del destilador como en la compresión. Otra forma de reducir la demanda energética del recalentador de la columna de destilación es aumentar la temperatura de entrada en el destilador de la disolución amina-CO₂ (*heat integration*). Una vez vistas las posibilidades descritas hasta ahora de reducir la demanda energética en el proceso de destilación (Figura 120) se pueden también estudiar la aplicación simultánea de varias de ellas [360].

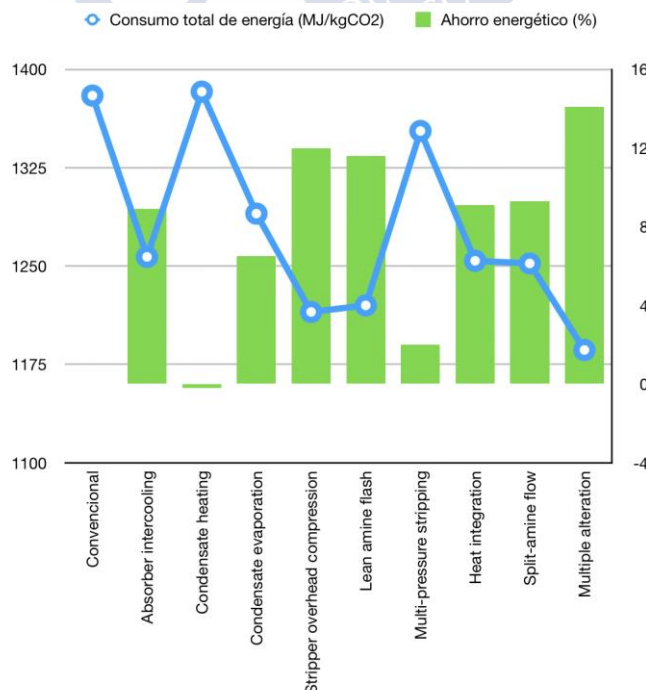


Figura 120: Energía asociada a diferentes configuraciones del proceso de captura por absorción
Elaboración propia a partir de [360]

En lo que respecta a los disolventes, una disolución de entre un 20% y un 30% en peso de MEA se puede considerar como de referencia entre los sistemas comerciales, sobre todo en los primeros desarrollos. Su buen comportamiento como absorbente de CO₂ tiene como inconvenientes las importantes necesidades energéticas para su regeneración, entre 3.2 y 4.2 GJ/tCO₂, el hecho de que la disolución rica en CO₂ es altamente corrosiva y requiere grandes cantidades de disolución en circulación lo que implica equipos de grandes dimensiones y mucho consumo energético [358]. Estos inconvenientes, sobre todo lo que respecta a las necesidades energéticas, han estimulado la búsqueda de disolventes alternativos (Tabla 65). Los factores fundamentales que hay que tener en cuenta en las diferentes sustancias para ser consideradas como disolventes están la velocidad de absorción del CO₂ por parte del disolvente (cinética de la reacción), su capacidad de absorción, ya que cuanto mayor sea esta el flujo de disolvente necesario sería menor y se reduciría la demanda energética en la regeneración. El calor de absorción del disolvente es también una característica fundamental ya que cuanto menor sea menor será la energía necesaria en la regeneración [352]. Existen otras características de los posibles disolventes que, aunque no afectan a las necesidades energéticas del proceso sí afectan a aspectos ambientales y de costes de operación y mantenimiento (OPEX). Entre otras, la toxicidad, volatilidad, corrosión, nivel de degradación y viscosidad (que aumentan las necesidades de los equipos de bombeo) son características a considerar [352].

En definitiva, hay dos aspectos claros que caracterizan la captura de CO₂ mediante disolventes. Por un lado, las grandes necesidades energéticas en la regeneración del disolvente y por otro, instalaciones de grandes dimensiones que conllevan unos costes muy elevados.

Tabla 65: Disolventes utilizados y estudiados para procesos de captura de CO₂ por absorción química
Elaboración propia a partir de [352] [360]

Disolvente			Ventajas	Inconvenientes
MEA	Monoetanolamina	C ₂ H ₇ NO	Alta reactividad	Corrosiva Tóxica Elevado calor de absorción
DEA	Dietanolamina	C ₄ H ₁₁ NO ₂		Menor velocidad de reacción
MDEA	Metildietanolamina	C ₁₂ H ₁₇ NO ₂	Bajas necesidades energéticas Estabilidad y capacidad elevada	Menor reactividad
DETA	Dietilentriamina	C ₄ H ₁₃ N ₃	Mayor capacidad de absorción que MEA. Menores necesidades energéticas que MEA En mezcla con piperazina mejora la su eficiencia	
Líquidos iónicos	hexafluorofosfato de 1-n-butil-3-metilimidazolio	C ₈ H ₁₅ F ₆ N ₂ P	Alta solubilidad del CO ₂ Estabilidad térmica	Viscosidad muy elevada
	Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	Alta capacidad de absorción Menor coste que otros disolventes Ausencia de hidrógeno que mejora la seguridad de las instalaciones	Baja tasa de reacción aunque puede ser mejorada con una disolución Benfield (<i>amine-promoted</i>)

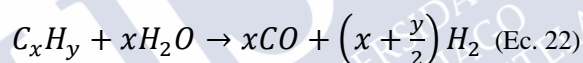
Disolvente			Ventajas	Inconvenientes
			Bajas pérdidas del disolvente al no ser volátil	hot K_2CO_3 solution)
PZ	Piperazina	$C_4H_{10}N_2$	Alta velocidad de reacción. También en combinación con otras aminas	Tiene una solubilidad en agua limitada Más volátil que MEA
KS-1™	<i>sterically-hindered amines</i>			

5.2.2.1. Captura pre-conversión

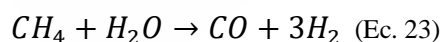
En la captura pre-conversión o pre-combustión se trata el combustible para la eliminación del carbono previa a su combustión. El proceso tiene lugar en tres etapas: 1) Producción de gas de síntesis, 2) Conversión de CO a CO_2 y 3) Separación CO_2 , H_2 [361].

En la primera etapa se produce gas de síntesis, cuyos principales componentes son CO y H_2 para posteriormente ser separados. Este tratamiento puede ser mediante diferentes procesos: reformado con vapor de agua (reacción endotérmica), oxidación parcial del combustible con oxígeno (reacción exotérmica), reformado autotérmico y gasificación con vapor de agua [362], [361].

El caso del reformado con vapor de agua es el proceso industrialmente más común para la producción de hidrógeno. En el caso de un hidrocarburo genérico:

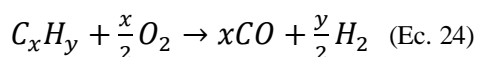


En el caso de utilizar como combustible el gas natural la reacción se denomina de forma más concreta reformado de metano con vapor (*Steam Methane Reforming – SMR*) y la reacción quedaría:

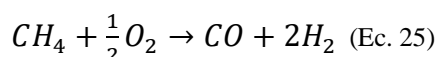


La reacción tiene lugar a temperaturas de entre 750 y 900°C a presiones de entre 20 y 30 bares con rendimientos térmicos del 81%. Con esta reacción se obtienen grandes cantidades de hidrógeno debido su alto contenido en las sustancias que intervienen en la reacción, pero las elevadas temperaturas a las que tiene lugar (siendo endotérmica) suponen grandes requerimientos energéticos en forma de aporte de calor [362], [361].

En los procesos de oxidación parcial (*Partial Oxidation – POX*) se hace reaccionar el combustible con oxígeno muy puro a altas presiones, de 30 a 75 bares, en una reacción exotérmica que tiene lugar a temperaturas de 1300 a 1400°C con rendimientos térmicos o eficiencia energética del 70%. En el caso de un hidrocarburo genérico:

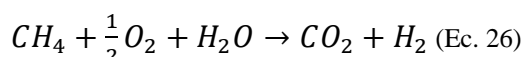


Para el gas natural tendríamos:

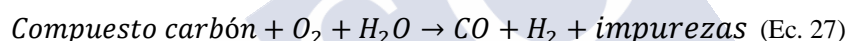


Este proceso es muy versátil en lo que respecta a los combustibles ya que puede aplicarse a combustibles de baja calidad [362], aunque su principal aplicación es para la gasificación del petróleo y su uso con gas natural también es muy común en zonas con precios bajos para este combustible [361].

El reformado autotérmico (*Autothermal Reforming* – ATR) es una combinación del reformado con vapor de agua y de la oxidación parcial. Su principal ventaja consiste en que el calor necesario para la reacción endotérmica del reformado de vapor de agua es aportado por la reacción exotérmica de oxidación parcial. El rendimiento térmico obtenido es de un 76%, a medio camino entre los dos procesos anteriores y la reacción tiene lugar a temperaturas de entre 1100 a 1400°C y a presiones de entre 20 y 60 bares [362]:



Por último, el proceso de gasificación con vapor de agua (*steam gasification* – SG) consiste en una combustión parcial mediante en el que se obtiene gas de síntesis, que en el caso de producción energética se utiliza como combustible para la generación de electricidad como es el caso de las centrales de gasificación integrada en ciclo combinado (GICC) [361].



La segunda etapa consiste en la conversión de monóxido de carbono presente en el gas de síntesis en dióxido de carbono mediante la reacción de desplazamiento del agua:



La separación del CO₂ se realiza mediante disolventes físicos o químicos, típicamente MEA y la regeneración de estos disolventes implica gasto energético. Este gasto es menor en el caso de disolventes físicos, como selexol o rectisol, que además de ser más adecuados para situaciones con presiones muy elevadas, también son más eficientes en concentraciones elevadas de CO₂. Estos disolventes físicos se suelen utilizar en centrales de gasificación integrada de ciclo combinado (IGCC). Además de en estas instalaciones la tecnología pre-combustión se utiliza en la producción de amoníaco y en la separación de gases [363].

5.2.2.2. Oxidación

En el proceso de oxidación la combustión tiene lugar en presencia de oxígeno casi puro, lo que hace reducir la cantidad de nitrógeno en los gases de combustión frente a la combustión con aire, de forma que estos gases están formados fundamentalmente por dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, partículas y el oxígeno restante de su uso en exceso para garantizar la combustión completa. El uso del oxígeno casi puro requiere de una primera etapa de separación del oxígeno del aire. Las partículas pueden ser separadas mediante precipitadores electrostáticos, mientras que el SO₂ se elimina mediante desulfurizadores y el vapor de agua mediante refrigeradores.

El gas restante está formado por entre un 80% y un 98% de CO₂ dependiendo del combustible utilizado [364] [365].

5.2.2.3. Captura de CO₂ directamente del aire (*Direct Air Capture – DAC*)

Hasta ahora se han descrito métodos y procedimientos para la captura del dióxido de carbono generado en determinados procesos industriales para con ello evitar el aumento en su concentración en la atmósfera. Sin embargo, la reducción de las emisiones no es el único camino de lucha contra el cambio climático, sino que la captura del CO₂ atmosférico puede ser no solo un complemento a las tecnologías de mitigación, sino que puede sentar las bases para que en un futuro teóricamente incluso pudiera revertirse la situación. Es lo que se conocen como tecnologías de emisiones negativas (*Negative Emissions Technologies – NET*).

Entre las tecnologías de captura de CO₂ atmosférico se encuentran (Figura 121): 1) bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ (*BECCS, Bioenergy with Carbon Capture and Storage*), 2) Repoblaciones forestales y reforestaciones (AR, *Afforestation and Reforestation*), 3) Secuestro del dióxido de carbono en el suelo y biochar, 4) Meteorización mejorada (*EW, Enhanced Weathering*) y alcalinización de los océanos. 5) Captura directa del aire y almacenamiento de dióxido de carbono (*DACCS, Direct Air Carbon dioxide Capture and Storage*) y 6) Fertilización de los océanos [366].

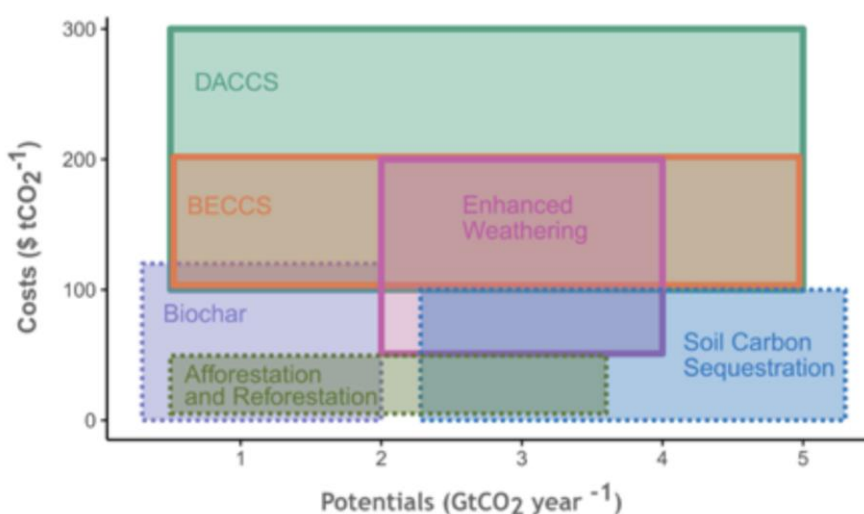


Figura 121: Costes estimados y potencial de captura y almacenamiento a 2050 del CO₂ atmosférico [366]

La captura directa del CO₂ del aire son técnicas que capturan el dióxido de carbono del aire mediante procesos químicos ya sea por absorción o adsorción con alta temperatura en el caso de los disolventes líquidos o baja temperatura en el caso de las sustancias sólidas.

En el caso de la absorción el proceso tiene lugar en dos ciclos (Figura 122), el primero propiamente de absorción donde el aire contacta a temperatura ambiente con el disolvente (por ejemplo, NaOH o KOH) ya sea con el flujo natural del aire o mediante ventiladores. Estos hidróxidos reaccionan con el dióxido de carbono presente en el aire formando los correspondientes carbonatos, en forma de disolución. En el segundo ciclo, para la regeneración del disolvente, se hace reaccionar el carbonato formado en el primer ciclo

con hidróxido de calcio, donde se vuelve a obtener el disolvente inicial y carbonato cálcico del que, mediante la aplicación de calor se extrae el dióxido de carbono (Tabla 66) [367], [368]. En el caso de la adsorción el aire se hace pasar por un filtro adsorbente en el que el CO₂ queda adherido y el aire queda libre de dióxido de carbono. Una vez que el filtro adsorbente está saturado de CO₂ este se libera aplicando calor a una temperatura que depende del adsorbente [368].

Tabla 66: Procesos químicos de captura de CO₂ del aire por absorción
Autor a partir de [367] [368]

	Disolvente	
	Hidróxido sódico (NaOH)	Hidróxido de potasio (KOH)
contacto	$2NaOH_{(aq)} + CO_{2(g)} \rightarrow Na_2CO_{3(aq)} + H_2O_{(l)}$ (Ec. 29)	$2KOH_{(aq)} + CO_{2(g)} \rightarrow K_2CO_{3(aq)} + H_2O_{(l)}$ – 95,8 kJ/mol (Ec. 30)
caustificador	$Na_2CO_{3(aq)} + Ca(OH)_{2(s)} \rightarrow 2NaOH_{(aq)} + CaCO_{3(s)}$ (Ec. 31)	$K_2CO_{3(aq)} + Ca(OH)_{2(s)} \rightarrow 2KOH_{(aq)} + CaCO_{3(s)}$ – 5,8 kJ/mol (Ec. 32)
calcinador	$CaCO_{3(s)} + calor \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$ (Ec. 33)	$CaCO_{3(s)} + calor \rightarrow CaO + CO_{2(g)}$ 178,3 kJ/mol (Ec. 34)
apagado de cal	$CaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Ca(OH)_{2(s)}$ (Ec. 35)	$CaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Ca(OH)_{2(s)}$ – 63,9 kJ/mol (Ec. 36)

Uno de los principales inconvenientes es el consumo energético que si ya veíamos que era elevado en la captura de los gases de combustión en este caso todavía lo es más debido a que la concentración del CO₂ en el aire es entre 100 y 300 veces menor que en los gases de combustión [366]. En gran medida este consumo energético es derivado de las temperaturas del proceso de separación del CO₂ del CaCO₃ mediante la aplicación de calor o por el calentamiento de los filtros en procesos de adsorción/desorción para liberar el CO₂. En diferentes procesos utilizados las temperaturas oscilan entre 80 y 800°C [369]. El aporte energético para el funcionamiento de estos procesos se repartiría entre la energía eléctrica necesaria para los ventiladores y los movimientos de la solución en el caso de los procesos de absorción y energía térmica en ciclo de regeneración. La empresa Carbon Engineering informa de que su en su proceso de absorción el aporte estaría en torno a 5,21 GJ (1.458 kWh) en gas natural y 366 kWh de electricidad, con un coste de captura de entre 94 y 232 \$/t de CO₂ [367], y hay autores que sitúan los costes en el plazo de una década de en un entorno de 100\$/t de CO₂ para los procesos de adsorción. A nivel prospectivo, se espera que los costes de captura directa de CO₂, disminuyan de forma muy importante tanto en las tecnologías de baja como de alta temperatura [368].

5.2.2.1. Bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂ (*Bioenergy and Carbon Capture and Storage – BECCS*)

La utilización de biomasa para la producción de energía por sí sola tendría una consideración neutra en las emisiones ya que la biomasa constituye un almacenamiento de dióxido de carbono temporal muy bajo. Introduciendo la captura de CO₂ en el proceso, se alcanzaría la negatividad en las emisiones. A la combustión de biomasa para la producción de calor como uso final o como medio para la producción eléctrica, en la actualidad el concepto de bioenergía se extiende a su uso como biocombustible (conversión) utilizado en vehículos, como es el caso de bioetanol. La procedencia de la biomasa es muy variada: restos de la industria forestal, agrícola o alimentaria, plantaciones realizadas de forma expresa como materia prima, residuos orgánicos procedentes de la recogida selectiva o cultivo de algas. La captura del dióxido de carbono

durante el tratamiento de la biomasa e incluso en algunos procesos de combustión o conversión darían como resultado un resultado neto negativo de emisiones.

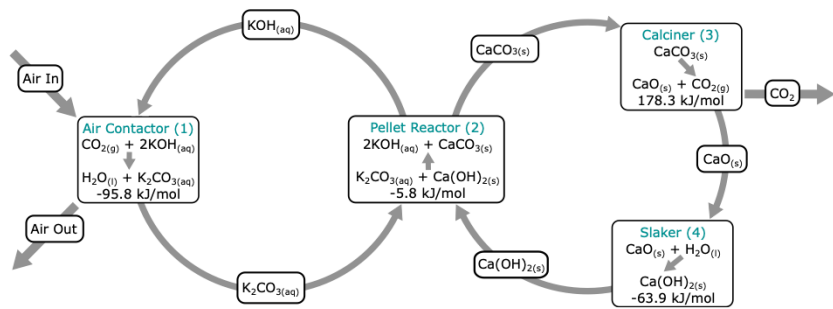


Figure 1. Process Chemistry and Thermodynamics

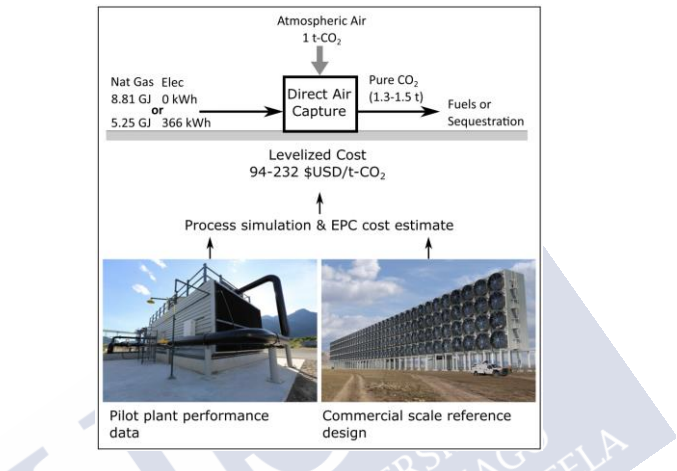


Figure 2. Overview of Process Showing Mass and Energy Balances

Figura 122: Proceso de captura de CO₂ atmosférico de Carbon Engineering [367]

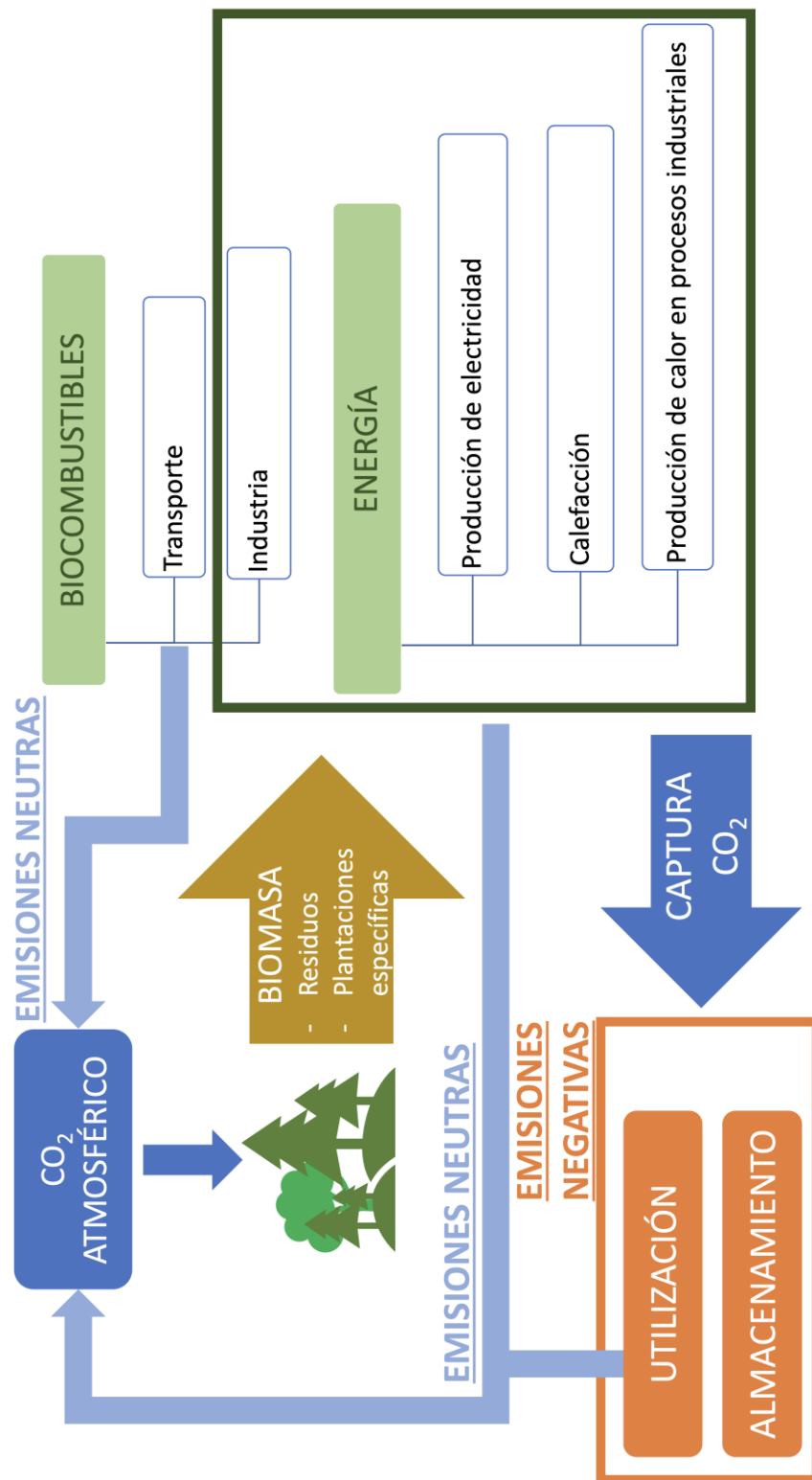


Figura 123: Procesos BECCS
Elaboración propia

En la actualidad una de las mayores aplicaciones energéticas de la biomasa está en la producción de biocombustibles donde la tecnología es madura y ampliamente utilizada. La madurez tecnológica, o estados próximos a esta madurez, es característica de muchas tecnologías basadas en la biomasa. Sin embargo los niveles más altos de despliegue de la utilización de la biomasa requerirían la dedicación de enormes recursos, entre los que se estima una producción de cereales que triplicaría la actual producción mundial con el correspondiente suelo utilizado, un consumo de agua que duplicaría el actual correspondiente a la agricultura y veinte veces el uso actual de nutrientes [370]. Esto requiere de el establecimiento de equilibrios entre las necesidades de uso de la biomasa y las implicaciones asociadas a la producción de la materia prima, como es el caso de posibles cambios en los usos de suelo actualmente forestal para su dedicación a los cultivos de materia prima para la biomasa, con la consiguiente deforestación y la afectación a la seguridad natural, y otras situaciones como la subida de precios de productos alimentarios debido a su uso alternativo y mejor pagado como materia prima para la biomasa o por el abandono por parte de los productores de cultivos alimentarios por cultivos para su uso energético.

5.2.3. Utilización del CO₂

En la actualidad existen numerosas aplicaciones para la utilización del CO₂ a nivel industrial. Sin embargo, hay dos cuestiones fundamentales que limitan la visión de este uso como elemento mitigador del efecto invernadero y por lo tanto del cambio climático. Por un lado, las cantidades limitadas que se usan de CO₂ a nivel industrial en relación con el producido y, por otro lado, en muchas de las aplicaciones actuales el tiempo que el gas permanece retenido por su uso es muy limitado y su liberación tiene lugar en un tiempo muy breve desde su uso. En definitiva, para que el uso del CO₂ tuviera un efecto mitigador debería comportarse como un almacenamiento durante el mayor tiempo posible.

El uso del CO₂ puede ser por su utilización directa como es el caso de su uso en la extracción de petróleo como técnica EOR (*Enhanced Oil Recover*) en lo que se conoce como producción terciaria que, debido a la acción combinada de la capacidad disolvente del CO₂ supercrítico, la hidrofobia del petróleo y la disminución de la viscosidad de la mezcla CO₂-petróleo, permite incrementar en un 15% la producción del yacimiento [371]. Otros usos del CO₂ serían su utilización como precursor de otras sustancias y compuestos que puedan ser utilizados. Esto evidentemente requiere de la conversión del CO₂ en otras sustancias a través de diferentes procesos: 1) Conversión termoquímica e hidrogenación del CO₂, 2) conversión electroquímica y fotoquímica del CO₂, 3) conversión de CO₂ a sólidos carbonatados y 4) conversión biológica del CO₂ [372]. En el caso de la conversión termoquímica, se utiliza calor y otros compuestos químicos, así como presión e incluso radiación electromagnética para la obtención de los productos derivados, mientras que con la reducción el CO₂ se hace reaccionar con H₂ para dar lugar a dichos productos. Estas reacciones tienen lugar mediante procesos catalíticos ya que, debido a la estabilidad de la molécula de CO₂, las reacciones únicamente van a tener lugar si se aporta calor que proporcione la energía de activación necesaria. El uso de catalizadores disminuye la energía de activación necesaria y aumenta la tasa de conversión del dióxido de carbono aumentando, por lo tanto, el rendimiento de la reacción.

En este sentido se han abierto caminos en el uso del CO₂ en ámbitos más duraderos, como materiales de construcción y componentes precursores de la fabricación de

polímeros. Por ejemplo, existen varios proyectos para la obtención de polioles a partir de CO y CO₂ sustituyendo al petróleo como materia prima [373], [374], [375]. La reacción de los polioles con isocianato da lugar al poliuretano. El poliuretano es un material usado de forma masiva en la sociedad actual ya sea en forma de espumas o en aplicaciones CASE (*Coatings, Adhesives, Sealants, Elastomers*) [376], por lo que, de confirmarse este camino sería un hito muy importante en los usos industriales del CO₂. [377]. También se han iniciado estudios para el uso del dióxido de carbono para la obtención de nuevos materiales como grafeno, nanotubos de carbono, fullerenos, fibra de carbono. La realidad es que la mayoría de las aplicaciones que servirían como mitigadoras del efecto invernadero están todavía en fase de desarrollo.

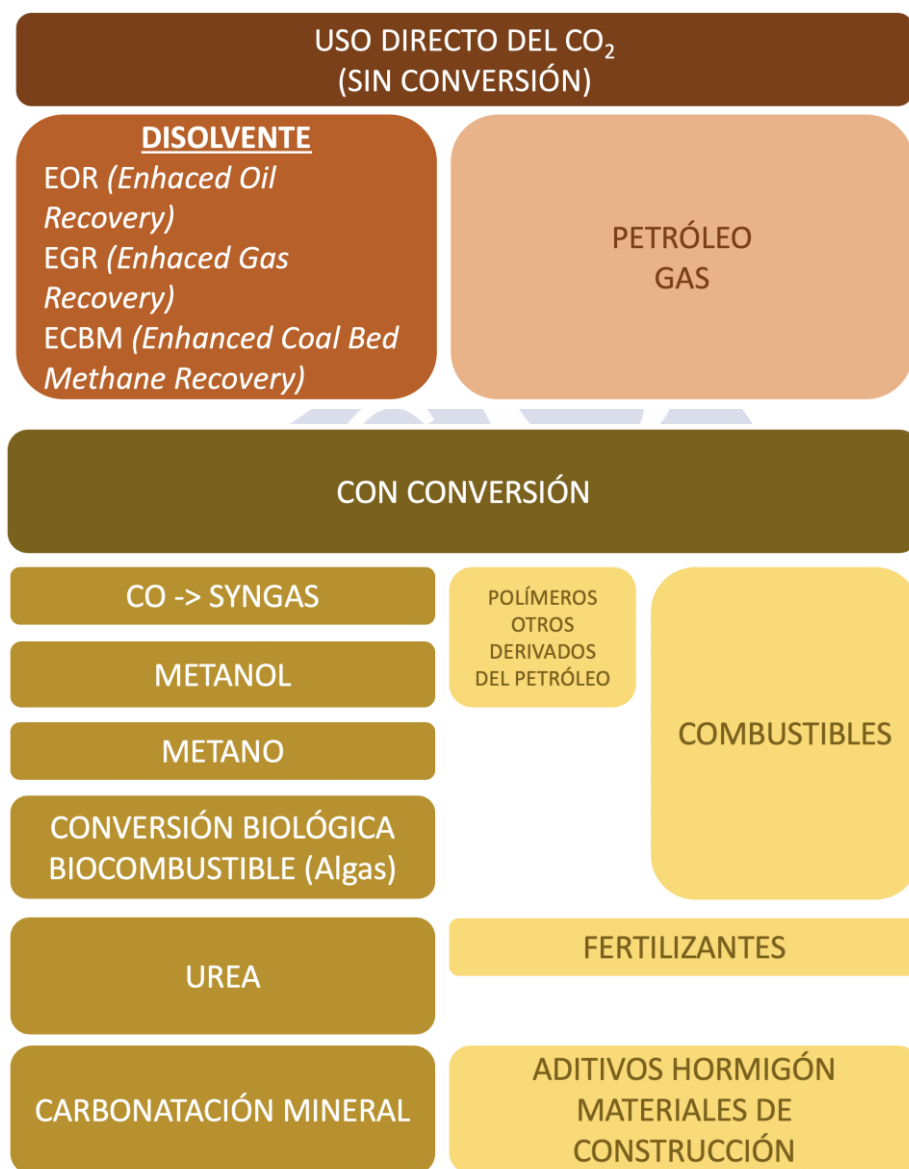


Figura 124: Usos del CO₂ considerados en este texto
Elaboración propia

En cualquier caso, la viabilidad económica y ambiental de las aplicaciones deberían ser analizadas mediante herramientas que analicen la sostenibilidad de los procesos. En este sentido, el análisis de flujos de materiales y energía, MEFA (*Material and Energy*

Flow Analysis), que evalúa entradas, salidas y almacenamiento de materiales y energía en los procesos (materias primas, materiales auxiliares, energía, productos, emisiones atmosféricas, efluentes líquidos, residuos sólidos y otras emisiones y permite identificar los flujos mejorables (*improvable flows, IF*), entendiendo como tales aquellos relevantes del proceso que pueden ser mejorados [378]. Una vez identificadas estas ineficiencias o posibilidades de mejora es necesario identificar las actuaciones tecnológicas que lleven a su corrección. El análisis BAT (*Best Available Techniques*) es una herramienta fundamental para ello, de forma que se identifiquen tecnologías que propongan actuaciones alternativas a los procesos ineficientes, o bien se mitiguen las ineficiencias en procesos no sustituibles o que no tengan alternativas tecnológicas claras. Este análisis de la sostenibilidad del proceso se ve complementado con herramientas de simulación de procesos, fundamentalmente en forma de software. Finalmente, un análisis de los impactos (*Impact Analysis, IA*) permitirá evaluar los efectos de las soluciones tecnológicas adoptadas a partir del análisis BAT y compararlas con la situación base o bien otras posibles alternativas tecnológicas. Se han realizado estudios con la aplicación combinada de estas herramientas en diferentes sectores como el alimentario [379], [380], pesquero [381], cerámico [382] equipamiento deportivo marino [383] y en procesos convencionales de obtención de hidrógeno a partir de reformado de metano [384]. Además de estas herramientas, existen otras más convencionales como TEA (*Techno-Economic Assessment*) [385], mediante el que se evalúa el desempeño desde un punto de vista técnico y económico del proceso o del producto y LCA (*Life Cycle Assessment*) que evalúa sus impactos ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida cuantificando la entradas de materia y energía y las salidas, incluyendo los desechos [79]. Las técnicas de análisis de flujos de materiales y energía y de análisis de mejoras técnicas disponibles pueden combinarse con el análisis del ciclo de vida. En los que respecta a la metodología LCA, está ampliamente aceptada y consolidada y ya forma parte de las normas ISO (UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia) y es además requerida por legislación ambiental de ámbito europeo. Esta norma ISO divide la metodología LCA en cuatro fases interdependientes entre sí: (1) Definición del objetivo y el alcance, (2) Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, (3) Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida e (4) Interpretación. La metodología TEA no dispone de una norma que estandarice su realización, pero se han desarrollado guías [385] que dividen el proceso en las siguientes fases: (1) Objetivo y Alcance, (2) Inventario, (3) Cálculo de Indicadores e (4) Interpretación.

En definitiva, mediante el uso combinado de las herramientas descritas se puede construir un sistema de evaluación de los procesos consistente con criterios de sostenibilidad.

5.2.3.1. Producción de urea a partir de CO₂

La urea (NH₂-CO-NH₂) se utiliza ampliamente de diferentes ámbitos. Su uso a nivel industrial es muy intensivo y está presente en resinas, productos de sellado, catalizadores, adhesivos, disolventes, colorantes, aditivos para pinturas y recubrimientos. Está presente también en agentes humectantes y deshidratantes, fotosensibles, tratamiento de superficies y en la fabricación de medicamentos. Uno de los principales usos de la urea tiene lugar en la agricultura, sobre todo como fertilizante nitrogenado y como suplemento en la alimentación animal. La urea se ha utilizado como agente de deshielo en pistas de aeropuertos y también está presente en productos de consumo como en productos de limpieza y cosméticos [386].

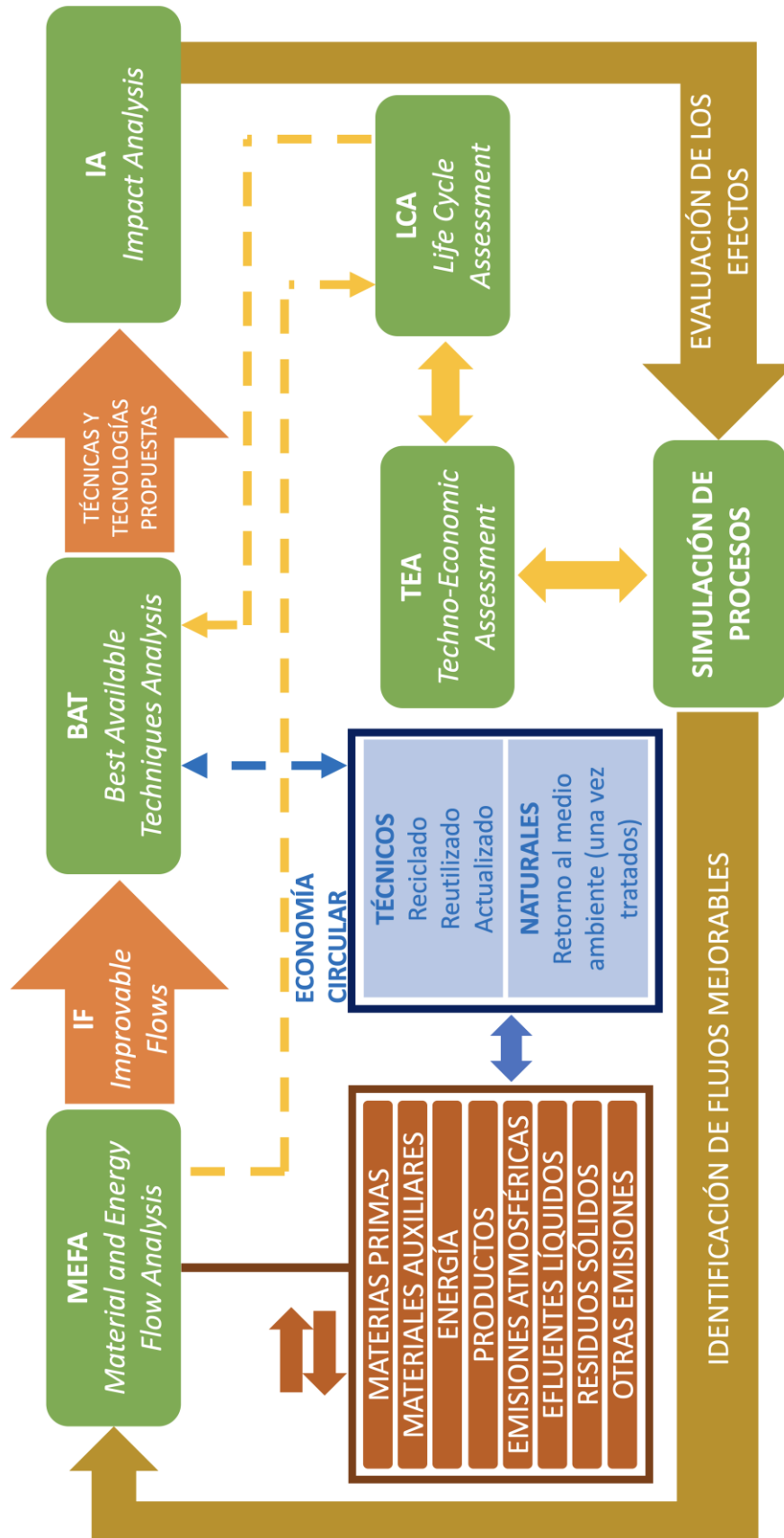
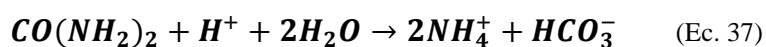


Figura 125: Sistema de evaluación de procesos con criterios de sostenibilidad
Elaboración propia

La obtención de la urea se produce mediante la reacción de CO_2 con amoníaco (NH_3) a una temperatura de entre $170\text{-}200^\circ\text{C}$ y a una presión de entre $130\text{-}200\text{ atm}$ mediante la descomposición del carbamato amónico ($\text{NH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$) obtenido de dicha reacción.

El efecto mitigador de la producción de urea a partir de CO_2 es de carácter muy limitado, ya que si bien como ya se ha indicado tiene un gran número de aplicaciones, el elevado contenido en nitrógeno de la urea (un 46% buscar referencia) hace que la mayor parte de la producción (entre un 80% y un 90% buscar referencia) se destine a la obtención de fertilizantes nitrogenados. Sin tener en cuenta otros efectos medioambientales de este tipo de fertilizantes, en lo que respecta a la reducción de emisiones de CO_2 no resulta eficaz ya que la retención del CO_2 en la urea es muy limitada en el tiempo. Esto es así, debido a que la reacción de la urea con el suelo hace que esta se descomponga de diferentes maneras en función de la acidez del suelo. En el caso de suelos pH próximos a la neutralidad la descomposición tiene lugar de acuerdo a la siguiente reacción [387]:



A medida que el pH del suelo es más ácido (sobre todo a partir de un pH de 6.2 buscar referencia) la descomposición tiene lugar de acuerdo a la siguiente reacción:



Es decir, se libera el CO_2 contenido en la urea, siendo el único fertilizante sintético que lo emite [387].

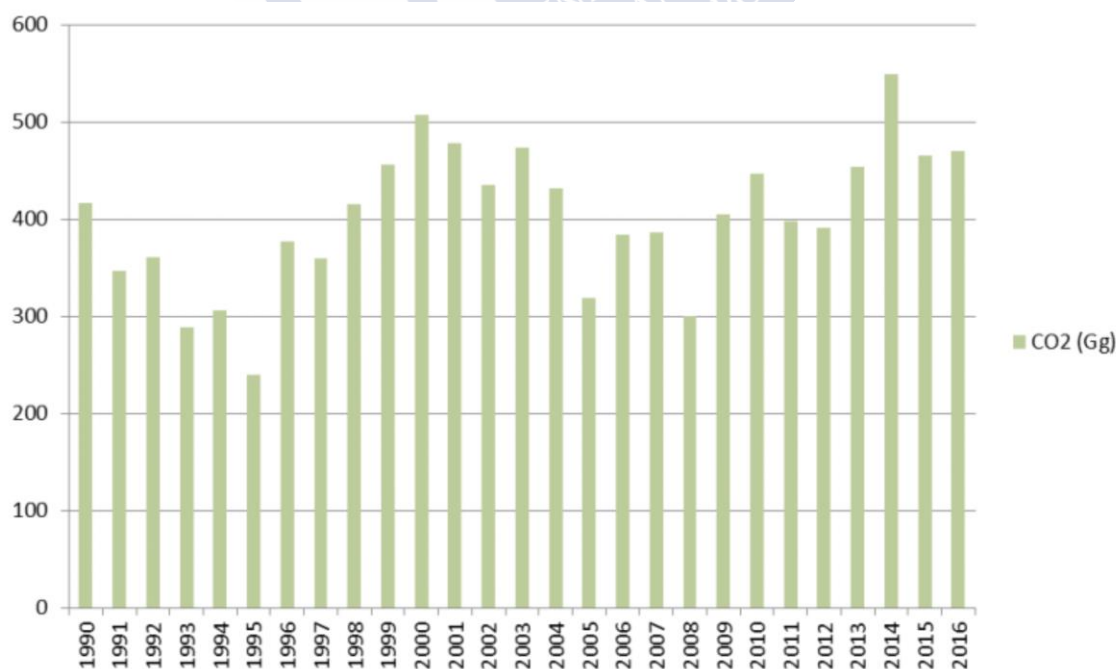


Figura 126: Emisiones de CO_2 en España debidas a la fertilización con Urea
Elaboración propia a partir de [387]

Otra de las aplicaciones de la urea es su uso en sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) utilizados para la reducción de emisiones de NO_x en vehículos, sobre todo camiones, y que utiliza una disolución de urea de nombre comercial *AdBlue*.

5.2.3.2. Uso del CO₂ para técnicas mejoradas de extracción de hidrocarburos (Enhanced Oil Recovery) (CO₂-EOR)

El petróleo extraído de un yacimiento mediante su propia presión (producción primaria) únicamente permite la extracción de entre un 5 y 30% del petróleo existente (*OOIP, Original Oil In Place*). Mediante la inyección de agua presurizada o gas natural se podría alcanzar hasta un 45% del recurso dependiendo del yacimiento (producción secundaria). Por lo tanto, todavía quedaría más de la mitad del recurso sin extraer debido a las limitaciones de la producción secundaria consistentes en que llegado a un determinado momento, la diferencia de densidades entre el petróleo y el agua no es suficiente para impedir que el agua inyectada se introduzca en el pozo de extracción. De hecho, se estima que en los yacimientos de Estados Unidos hasta dos tercios del crudo descubierto no ha sido extraído, lo que suponen 400 mil millones de barriles en reservas conocidas [388]. Para extraer parte del crudo que todavía queda en el yacimiento es necesario un tercer nivel de producción (producción terciaria) consistente en técnicas mejoradas de extracción del crudo (*EOR, Enhanced Oil Recover*). Entre las tecnologías EOR estarían la introducción de agua caliente o disolventes que reduzcan la viscosidad del petróleo o la introducción de polímeros líquidos que se interpongan entre el petróleo y el agua inyectada y que impida la circulación del agua a través del petróleo cuando la diferencia de sus densidades ya no es suficiente para impedirlo.

La utilización del CO₂ para la producción terciaria en los yacimientos de petróleo es actualmente uno de los usos con mayor potencial para la creación de un mercado lo suficientemente grande que haga rentable a nivel general el uso del CO₂ como un recurso productivo que contribuya a la mitigación de sus emisiones a la atmósfera.

La utilización del CO₂ para la producción terciaria de petróleo se basa en la interacción del CO₂ con el crudo, ya sea por mezcla (*Miscible Oil Recovery*) o por disolución (*Immiscible Oil Recovery*) de forma que facilita la salida de una parte adicional del petróleo remanente existente en los poros de la roca almacenadora del crudo una vez que ya han tenido lugar la producción primaria y la producción secundaria (Figura 127).

La mezcla se produce con mayor facilidad cuando la densidad del CO₂ es elevada, es decir, cuando está comprimido y también se ve favorecida cuando se trata de crudos ligeros. En cualquier caso, es necesaria una determinada presión (*MMP, Minimum Miscibility Pressure*) para que se produzca la miscibilidad entre el petróleo y el CO₂, por lo que puede ser necesaria una inyección de agua para presurizar el yacimiento [389]. Sin embargo, aún en el caso de que la presión del yacimiento esté por debajo del valor mínimo de presión de miscibilidad, el CO₂ se disolverá en el crudo disminuyendo su viscosidad y causando una expansión en su volumen que facilitará su recuperación [390]. En definitiva, los procesos que permiten el uso del CO₂ como técnica mejorada de extracción de hidrocarburos son la disminución de la viscosidad, la expansión del volumen del crudo, la reducción de la densidad del petróleo y del agua y la vaporización y extracción de porciones de crudo [391].

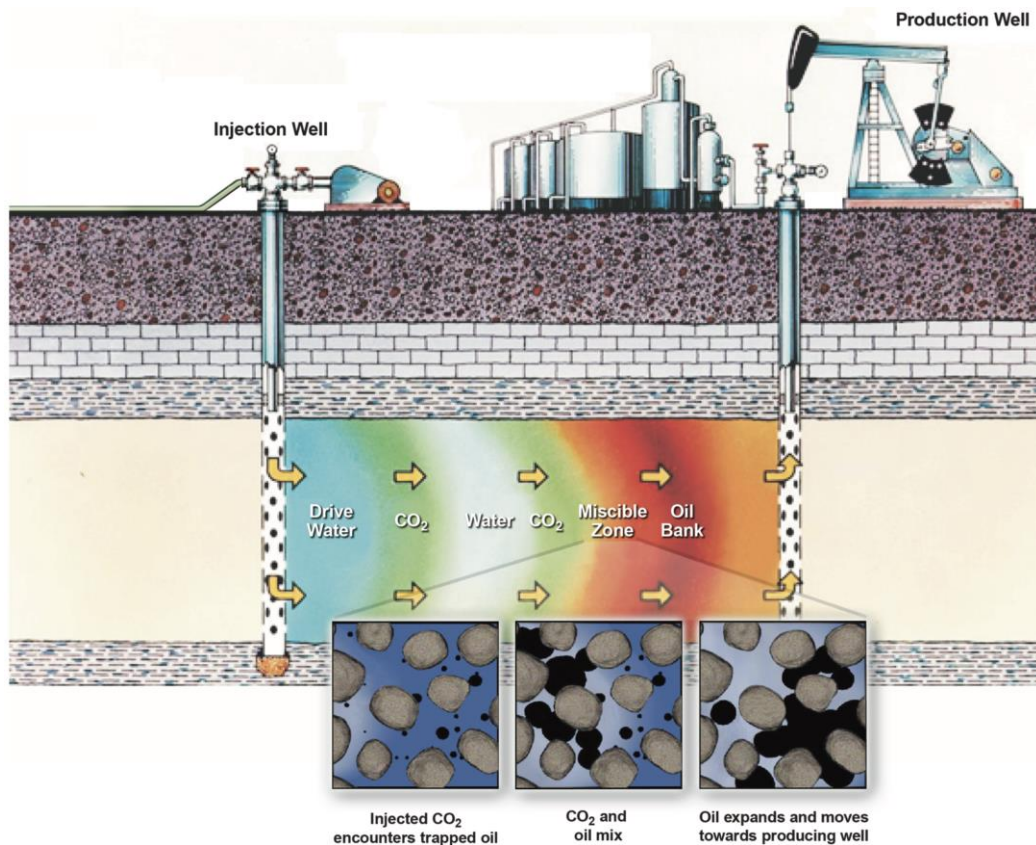


Figura 127: Producción terciaria utilizando CO₂ [389]

La inyección de agua también sirve para reducir las ineficiencias que se producen cuando tiene lugar el efecto derivado de la menor viscosidad del gas consistente en que una vez que el CO₂ ha entrado siguiendo una determinada trayectoria, el gas que se inyecte posteriormente va a seguir esta misma trayectoria. De esta forma tienen lugar inyecciones alternativas de agua y gas (*WAG, Water Alternating Gas floods*) que mejoran el proceso. En función de las características del yacimiento, la proporción de inyección estaría entre 0,5 y 4,0 volúmenes de agua por cada volumen de CO₂ [389]. Esta proporción puede ser también variable para un mismo yacimiento en un proceso denominado *Tapered WAG*, mediante el que el volumen relativo de gas respecto al de agua se va reduciendo progresivamente para mejorar la eficiencia de la utilización del CO₂. Esta mejora de la eficiencia hace que el proceso *Tapered WAG* sea el más ampliamente utilizado en la actualidad. Además de esta variación al proceso WAG también existe otra en la que los volúmenes relativos agua/gas son iguales, pero se finaliza con un aporte de un gas alternativo más barato como aire o nitrógeno. La elección de uno o varios de estos métodos depende aspectos como la geología del yacimiento, la roca almacén o la configuración de las perforaciones de inyección [390]. En lo que respecta a la configuración de los pozos es muy frecuente la formada por un cuadrado con cuatro pozos de inyección en los vértices y un pozo de producción en el centro o la situación inversa con un único pozo de inyección entre cuatro pozos de producción [390]. El volumen total del gas inyectado estaría entre el 15 y el 30% del volumen de los poros de hidrocarburo [389].

Aunque la mayor parte del CO₂ inyectado sale mezclado con el petróleo recuperado, hay una parte significativa que queda atrapado en los poros de las rocas del yacimiento y disuelto en el petróleo que todavía queda en el yacimiento, así como en el agua que pueda estar presente o que se inyecte. Esta presencia de CO₂ se incrementa con cada ciclo de recuperación. En la actualidad con la visión del EOR únicamente como medio de extracción adicional del recurso y debido al coste del CO₂ los procesos tratan de recuperar tanto dióxido de carbono como sea posible para su posterior reutilización. Se estima que entre un 40% y un 50% del CO₂ inyectado queda atrapado en el yacimiento [392].

El uso del CO₂ como técnica mejorada de extracción de hidrocarburos no es una tecnología novedosa ya que se lleva utilizando durante varias décadas sobre todo en Estados Unidos [393]. De hecho, desde principios de los años 50 se produjeron recuperaciones adicionales de petróleo utilizando agua carbonatada, aunque el primer experimento a gran escala tuvo lugar en el proyecto SACROC (*Scurry Area Canyon Reef Operator Committee*) en la cuenca pérmica [390].

En 2018 la producción de petróleo mediante EOR supuso un alrededor de un 2% del total [394], y de ese 2% un 19% fue mediante CO₂ (Figura 128 y Figura 129).

Lo que hace interesante el uso del CO₂ como EOR desde el punto de vista climático es la posibilidad de que sirva de forma simultánea como almacenamiento geológico del dióxido de carbono utilizado (CCS) actuando, de esta forma, como elemento mitigador de emisiones de CO₂. Esto supone una visión más amplia de lo que estrictamente es CO₂-EOR ya que esta actividad en sí utiliza la menor cantidad posible de CO₂. Incluso como se describía anteriormente en el diseño WAG/Gas al final del ciclo alternativo CO₂-Agua se utiliza un gas más barato que el dióxido de carbono (por ejemplo, el nitrógeno). La visión mitigadora de las emisiones de CO₂ conllevaría la utilización de la máxima cantidad de gas que se pueda almacenar, lo que incrementaría también la cantidad de petróleo recuperado respecto a la que en la actualidad se recupera debido al coste de la inyección del CO₂. En un punto intermedio estaría la explotación con beneficios de mercado de dos actividades diferentes: la extracción del recurso y el almacenamiento de CO₂. En función de estos tres escenarios se estima que para 2050 el almacenamiento acumulado del mínimo CO₂ necesario para extraer petróleo de forma rentable supondría un almacenamiento de 60x10⁹ toneladas de CO₂, mientras que la explotación con beneficios de la extracción del recurso y el almacenamiento supondría un almacenamiento acumulado de 240x10⁹ de CO₂ y por último la maximización técnicamente posible del almacenamiento en el yacimiento supondría un almacenamiento acumulado de 360x10⁹ de CO₂ en 2050 [393]. En la Tabla 67 se resumen diferentes parámetros para cada uno de los escenarios.

Tabla 67: Características de los diferentes escenarios de EOR y almacenamiento [393]

Proceso	Almacenamiento Acumulado 2050 (GTm)	Incremento Recuperación Petróleo (%)	Utilización CO ₂ (t CO ₂ /bbl)
EOR Convencional	60	6,5	0,3
EOR + Almacenamiento rentable	240	13	0,6
EOR + Máximo almacenamiento	360	13	0,9

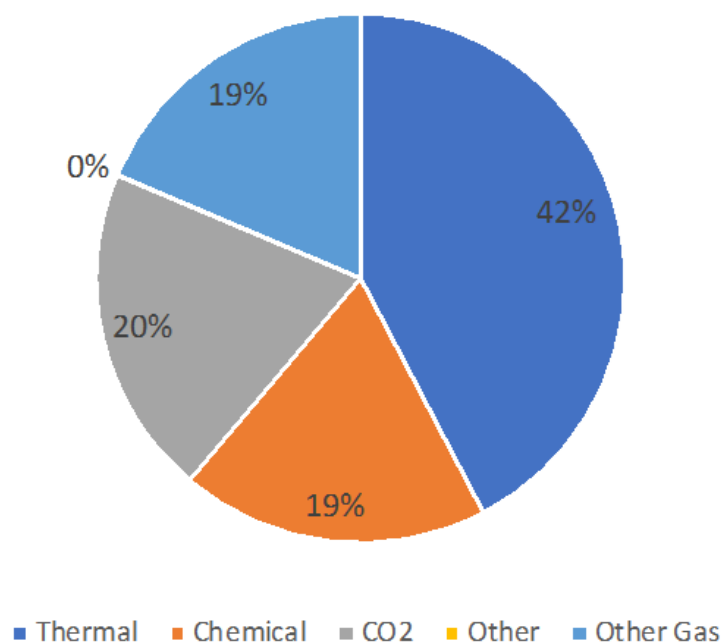


Figura 128: Producción de Petróleo mediante EOR: Porcentaje por tecnologías
Elaboración propia a partir de [394]

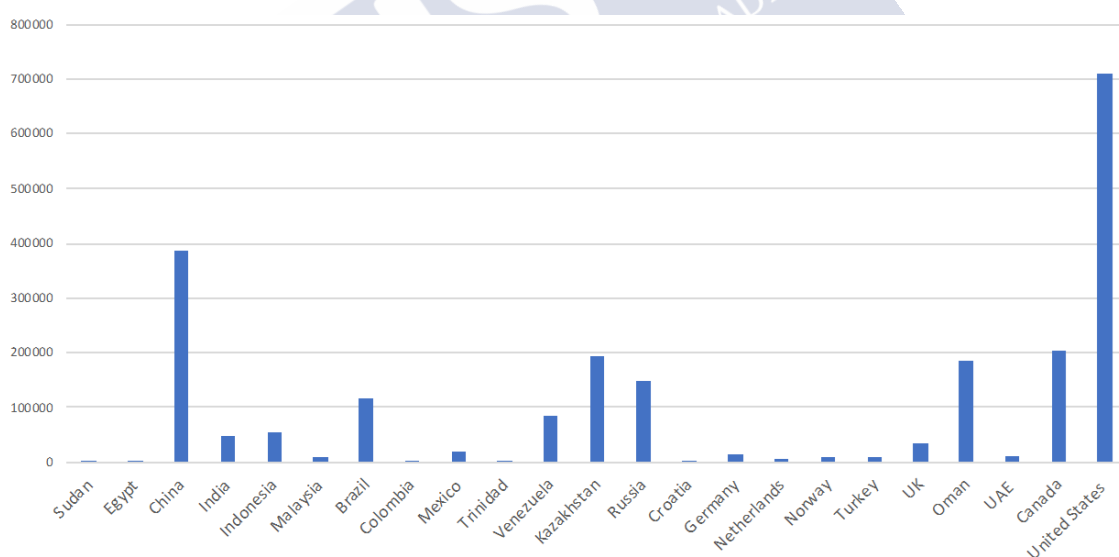


Figura 129: Producción de Petróleo mediante EOR: Producción por país 2017 (barriles/día)
Elaboración propia a partir de [394]

El aprovechamiento de las técnicas mejoradas de recuperación para el almacenamiento geológico de CO₂ conllevarían actividades adicionales asociadas, entre las que estarían (1) Evaluaciones sobre los riesgos de pérdidas debido a las características geológicas del yacimiento, (2) medición de las posibles emisiones y fugas de los equipos de superficie, (3) monitorización del yacimiento y (4) adaptación de los procedimientos de sellado de los pozos de forma que tengan en cuenta, por ejemplo el carácter corrosivo de la mezcla de agua y dióxido de carbono [393]. Estas actividades adicionales

supondrían costes adicionales, de forma que, para analizar la rentabilidad de cada uno de los procesos es necesario tener en cuenta las inversiones, costes e ingresos adicionales respecto a los otros procesos. En lo que respecta a los ingresos se ha de tener en cuenta que no habrá una mayor extracción del recurso en la EOR con máximo almacenamiento respecto al almacenamiento rentable, aunque sí de este último respecto a la EOR convencional. Respecto a los ingresos por CO₂ aumentarían para la EOR con máximo almacenamiento respecto al almacenamiento rentable, aunque también aumentarían tanto la inversión necesaria (CAPEX) como los gastos de operación (OPEX) (Figura 130).

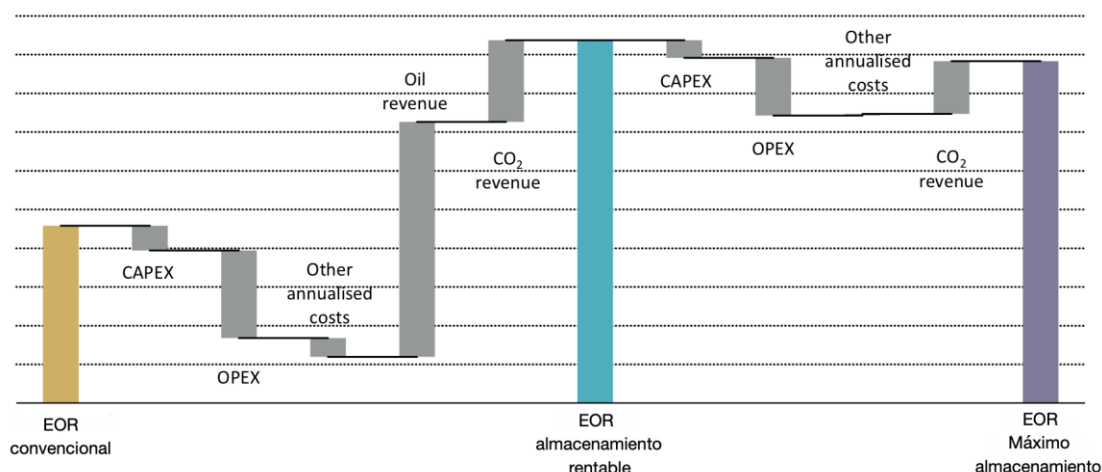


Figura 130: Inversiones, costes e ingresos de los diferentes procesos respecto a otros
Adaptado de [393]

Evidentemente, el petróleo extraído mediante CO₂-EOR va a sufrir el mismo proceso de extracción-transporte-refino-utilización que el resto del petróleo, que va a tener también asociadas emisiones de CO₂, por lo que para evaluar el carácter mitigador sobre el cambio climático es necesario conocer el balance neto teniendo en cuenta el CO₂ emitido frente al secuestrado (Tabla 68).

Tabla 68: Balance neto de las emisiones de CO₂ de los diferentes escenarios de EOR y almacenamiento [393]

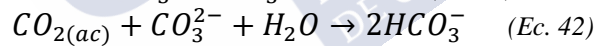
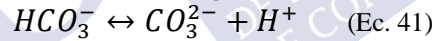
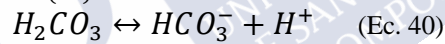
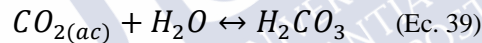
Proceso	Emisiones netas CO ₂ (t CO ₂ /bbl)
EOR Convencional	0,24
EOR + Almacenamiento rentable	-0,03
EOR + Máximo almacenamiento	-0,31

El uso combinado de las técnicas mejoradas de recuperación con el almacenamiento geológico del dióxido de carbono como medida mitigadora de emisiones de dióxido de carbono tiene aspectos favorables tales como que la capacidad de sellado del yacimiento ya está, en principio, acreditada por haber ya retenido los hidrocarburos durante millones de años, sin perjuicio de la necesidad de monitorización ya indicada anteriormente, primero, por las diferencias entre las características de cada sustancia y en segundo lugar por la mayor presurización del yacimiento sobre todo si se maximiza la cantidad de CO₂ a almacenar. Por otro lado, las zonas productoras tienen una amplia experiencia que permitiría establecer marcos regulatorios para esta nueva actividad, así como también se podría ver facilitada la aceptación social en dichas zonas [392].

Lógicamente, para que el CO₂-EOR tenga funcionalidad mitigadora sobre las emisiones de CO₂ el dióxido de carbono utilizado deberá ser antropogénico, al contrario de lo que sucede en gran parte en estos momentos. Como ya se ha visto, el mayor productor de petróleo mediante EOR es Estados Unidos y en su mayor parte utilizan CO₂ obtenido de fuentes naturales [392].

En definitiva, el éxito del CO₂-EOR como mitigador dependerá del establecimiento de un marco regulatorio estable que garantice su sostenibilidad económica y que sea reconocido en los mecanismos establecidos o que se establezcan en el futuro en las políticas de cambio climático.

CO₂-EOR tiene unos impactos potenciales sobre el ambiente específicos que destacan en el medio marino referidos a la transmisión de CO₂ a este medio a través de filtraciones. Estos impactos son compartidos con el propio almacenamiento definitivo del CO₂ en los yacimientos. La acidificación de las aguas marinas a nivel global es una preocupación ambiental importante y es derivada del aumento en las emisiones de dióxido de carbono, que no solo afecta a la atmósfera, sino también al medio marino que absorbe CO₂ de la atmósfera en cantidades más que importantes. De hecho, hasta un tercio del dióxido de carbono antropogénico está en el océano [395]. La acidificación se produce porque, una vez disuelto, el dióxido de carbono reacciona con el agua para formar ácido carbónico que, de forma inmediata se disocia en iones bicarbonato, que a su vez vuelven a disociarse. En ambas disociaciones se liberan protones lo que produce una bajada en el pH del agua ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$), aunque debido a que la disociación en iones bicarbonato no es completa disminuyen los iones producidos y por lo tanto la disminución del pH es menor que la esperada. La posible entrada de elevadas concentraciones de CO₂ a nivel local derivada de fugas en yacimientos petrolíferos en los que se ha inyectado el gas incrementará aún más la acidificación de las aguas en ese punto.



La acidificación de los océanos tiene como consecuencias reducciones en la supervivencia, calcificación, crecimiento, desarrollo y abundancia en gran parte de la vida marina que a su vez es de esperar que se traslada al resto de los organismos vivos del océano. Los estudios realizados hasta la fecha indican que los organismos más perjudicados por la acidificación son los que los mecanismos de calcificación son importantes como las algas coralinas, los corales y los moluscos [396].

Los efectos negativos sobre estos seres vivos son debidos a que la presencia de carbonato cálcico (CaCO₃) es fundamental para estos procesos biológicos de calcificación, y el carbonato cálcico puede disolverse dependiendo del “estado de saturación” (Ω) del carbonato cálcico en el agua marina, de forma que en el caso de infrasaturación ($\Omega < 1$) el carbonato cálcico (ya sea en forma de calcita o sobre todo aragonita ya que es más soluble que la calcita) se disuelve.

El estado de saturación depende fundamentalmente de la concentración de CO₃²⁻ [395]:

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{agua}}[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{agua}}}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{saturación}}[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{saturación}}} \quad (\text{Ec. 43})$$

Dado que [Ca²⁺] puede considerarse uniforme y sin cambios en el océano el estado de saturación sería:

$$\Omega = \frac{[CO_3^{2-}]_{agua}}{[CO_3^{2-}]_{saturación}} \quad (\text{Ec. 44})$$

Como los valores de [CO₃²⁻] decrecen con la disminución del pH del agua [395], la acidificación hace que los valores de Ω tiendan a decrecer y se pueden alcanzar valores inferiores a la unidad.

Estos efectos que ya están observando a nivel global en los océanos, pueden verse agravados a nivel local en zonas próximas a yacimientos utilizados como almacenamiento de CO₂ si se producen fugas del gas hacia el medio marino ya sea en el equipamiento de inyección durante el proceso de almacenamiento del gas o si las fugas se producen durante el propio almacenamiento.

5.2.3.3. Uso del CO₂ para la producción de combustibles sintéticos: *Power-to-liquid (PtL) / Power-to-Fuel / E-Fuels / Blue Crude*

De las más de 32 Gt de CO₂ emitidos en el mundo en 2016 en torno al 25% corresponde al transporte. Esto suponen cerca de 8 Gt, que aumentaron desde las poco más de 4,5 correspondientes a 1990. Aunque el continente americano sigue estando a la cabeza en emisiones debidas al transporte (con Estados Unidos muy destacadamente a la cabeza con un 69% de las emisiones del total de América), Asia está a punto de alcanzarle suponiendo el incremento el grueso del crecimiento de las emisiones frente a una estabilización de Europa y Oceanía e incluso de América a partir de 2005. También en África se observa un patrón de crecimiento que, aunque por el momento aporta poco a la cantidad total es necesario controlar su avance a medida que este continente se vaya industrializando (Figura 131) [397].

Entendemos como *E-fuels* a los combustibles gaseosos y líquidos como hidrógeno, gasolina sintética, gasóleo sintético generados mediante electricidad renovable [398].

Para alcanzar los objetivos climáticos de la Unión Europea será necesario usar este tipo de combustibles, ya que aún teniendo en cuenta una electrificación de los turismos elevada, la aviación, el transporte marítimo y el transporte de mercancías consumirá en un 70% estos combustibles. Para su producción será necesario incrementar la producción de electricidad mediante fuentes renovables y se estima que, en 2050 el 80% de la demanda de electricidad renovable será debida a la producción de combustibles [398]. En lo que respecta a los costes, en la actualidad los *e-fuels* cuestan hasta 4,5 € por litro de diésel equivalente y el coste objetivo estaría en torno a 1 €/litro.

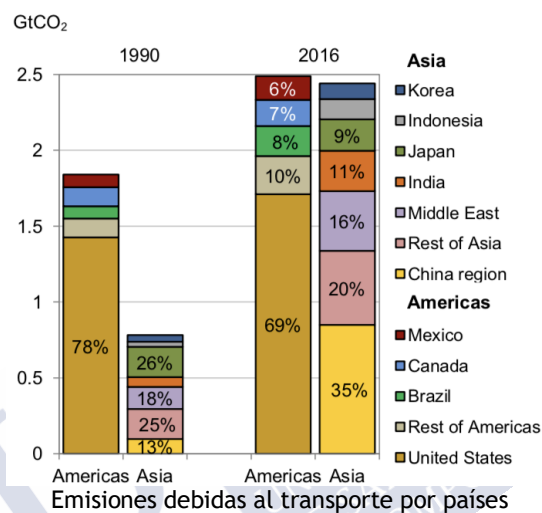
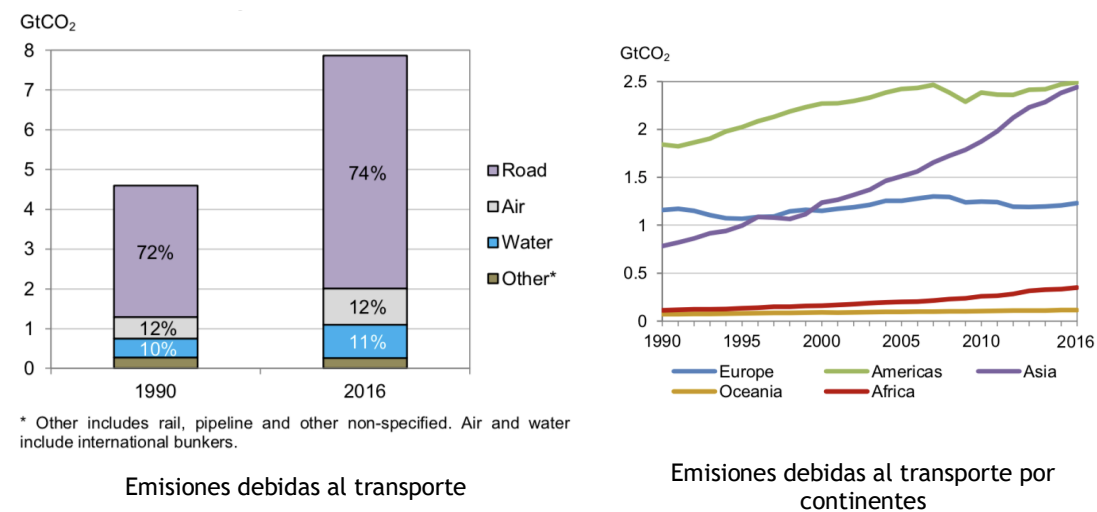


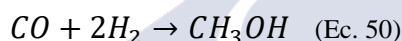
Figura 131: Emisiones debidas al transporte [397]

Es teoría es posible la obtención directa de hidrocarburos haciendo reaccionar el dióxido de carbono con el hidrógeno (Tabla 69).

Tabla 69: Sustancias obtenidas a partir de hidrogenación del dióxido de carbono (Informe de Singapur)

Metanol	$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$ (Ec. 45)
Dimetileter (DME)	$2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3OCH_3 + 3H_2O$ (Ec. 46)
Etileno	$2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3CH_2OH + 3H_2O$ $CH_3CH_2OH \rightarrow CH_2CH_2 + H_2O$ (Ec. 47)
Metano (Reacción de Sabatier)	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ (Ec. 48)
Ácido Fórmico	$CO_2 + H_2 \rightarrow HCOOH$ (Ec. 49)

Sin embargo, para que las reacciones de hidrogenación del CO₂ tengan lugar, es necesario un catalizador para hacer descender los niveles de energía necesarios para convertir el CO₂ en estas moléculas, por lo que es necesario disponer de sustancias altamente reactivas que puedan superar la baja reactividad del CO₂ que además implican reacciones con bajos rendimientos y baja selectividad [399]. Pero en la actualidad no hay disponible ningún catalizador que sea satisfactorio a nivel industrial [371] ya que, entre otras cosas también hay que tener en cuenta la energía necesaria para la obtención de los catalizadores [399] y su disponibilidad, ya que en muchos casos los que se están considerando en fase de investigación son elementos poco frecuentes y procedentes de zonas geopolíticamente inestables [400]. Aún así hay un ejemplo de planta con cierta capacidad de producción en Svartsengi, Islandia (planta *CO₂-to-Methanol* George Olah) con una capacidad de producción de 4000 toneladas de metanol al año con una conversión de 5600 toneladas de CO₂ al año [401], mientras que las plantas tradicionales de metanol, que usan como materia prima el gas natural y el carbón, están produciendo entre 2000 y 2500 toneladas al día, pudiendo llegar las mayores plantas a 5000 t/d [402]. Estas plantas obtienen el metanol a partir del gas de síntesis, obtenido a su vez de reformado de metano, mediante procesos catalíticos que utilizan catalizadores de Cu/Zn a temperaturas de en torno a 270 °C [403].



En el ámbito de las tecnologías CCU, los combustibles se obtendrían a partir de gas de síntesis (syngas), una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno, que se puede obtener combinando CO₂ con hidrógeno (H₂) mediante la reacción de desplazamiento de agua [403] (WGSR, *Water-Gas Shift Reaction*):

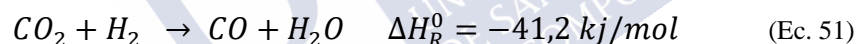
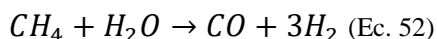


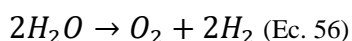
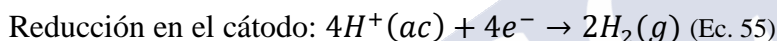
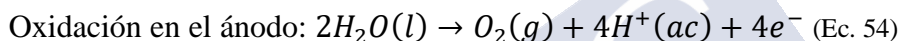
Figura 132: Planta George Olah CO₂ a metanol en Svartsengi, Islandia
Carbon Recycling International [401]

Esta reacción es utilizada en a nivel industrial en sentido inverso para la producción de hidrógeno haciendo reaccionar el monóxido de carbono con vapor de agua.

En la actualidad gran parte del H_2 producido se obtiene mediante el reformado de hidrocarburos, en concreto, del metano (CH_4) (*SMR, Steam Methane Reformer*). Sin embargo, la obtención de la máxima cantidad de H_2 mediante este método requiere emisiones de CO_2 , ya que con monóxido de carbono obtenido junto al hidrógeno se aplica el reverso de la reacción de desplazamiento del agua.



Por lo tanto, en un escenario de mitigación de emisiones de CO_2 no es un método aplicable. En este caso, la producción del hidrógeno mediante electrólisis utilizando electricidad procedente de fuentes renovables parece la solución más adecuada:



El consumo de agua estaría en torno a los 38 litros de agua por cada kg de hidrogeno producido por electrólisis, comparable a la cantidad utilizada en el proceso convencional de reformado de metano [404].

La electrólisis tiene lugar en dispositivos denominados electrolizadores, bien de tipo alcalino o en el caso de potencias elevadas de membrana de intercambio de protones (*PEM, Proton Exchange Membrane*).

En la actualidad se está desarrollando el proyecto Refhyne, que consiste en la instalación de un electrolizador PEM de 10 MW en la refinería de Rhineland (Colonia, Alemania), operada por Shell Deuchland Oils, y sería la mayor instalación de este tipo a nivel mundial, y reemplazará las instalaciones existentes basadas en el reformado de metano (SMR). La inversión prevista está cerca de los 20 M€ y su funcionamiento está previsto para 2020 con una producción anual de 1300 t de H_2 [405].

Una vez que se dispone del syngas, los combustibles se obtendrían fundamentalmente de dos maneras: la síntesis de Fischer-Tropsch y la síntesis de metanol [406].

Mediante la síntesis de Fischer-Tropsch, el gas de síntesis se hace pasar por un catalizador en el que la hidrogenación del monóxido de carbono causa una polimerización para dar hidrocarburos en forma de alcanos (n-parafinas con la forma C_nH_{2n+2}), alquenos (1-olefinas con la forma C_nH_{2n}), así como oxigenados, como alcoholes [407]. Estas reacciones tienen lugar en catalizadores de metales de transición, sobre todo hierro, cobalto y rutenio [408]. Las principales reacciones que tienen lugar en la síntesis de

Fischer-Tropsch son las indicadas en la Figura 133: Reacciones principales de la síntesis de Fischer-Tropsch [403]:

Figura 133: Reacciones principales de la síntesis de Fischer-Tropsch

Síntesis	Reacción
Parafinas	$nCO + (2n + 1)H_2 \rightarrow (C_nH_{2n+2}) + nH_2O$ (Ec. 57)
Olefinas	$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$ (Ec. 58)
Oxigenados (alcoholes)	$2nH_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2}O + (n - 1)H_2O$ (Ec. 59)
Reacc. desplazamiento del agua	$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$ (Ec. 60)

La síntesis de Fischer-Tropsch puede dar como resultado gran diversidad de hidrocarburos. Tanto la composición del gas de síntesis, es decir, la presión parcial de H₂ y CO, como las condiciones en las que tenga lugar la reacción (tipo de catalizador, tipo de reactor, presión y temperatura) van a determinar el tipo de producto obtenido. La variedad de los productos obtenidos mediante la síntesis se describe mediante la distribución Anderson-Schulz-Flory de forma que con una probabilidad de crecimiento de la cadena del hidrocarburo constante, α , se obtienen moléculas cada vez más largas hasta la obtención de ceras [403].

$$m_n = (1 - \alpha)\alpha^{n-1}; \quad \alpha = \frac{R_p}{R_p + R_t} \quad (\text{Ec. 61})$$

Donde: α : Probabilidad de crecimiento de la cadena, R_p : Tasa de propagación, R_t : Tasa de terminación

Los diferentes productos obtenidos van a depender de las condiciones en las que se realice el proceso, de forma que los aumentos de temperatura o los aumentos en el ratio H₂/CO del gas de síntesis disminuyen la probabilidad de crecimiento de la cadena de hidrocarburos, mientras que los aumentos en la presión a la que se desarrolla el proceso aumenta también la probabilidad del crecimiento de la cadena [409].

En el caso del metanol, con el que se empezaba este apartado, el gas de síntesis obtenido utilizando el CO₂ en la reacción de desplazamiento de agua y el hidrógeno procedente de electrólisis se aplicaría en el proceso catalítico mientras no estuviese disponible el catalizador satisfactorio a nivel industrial que permitiese la reacción directa de hidrogenación del CO₂. La producción de metanol es un aspecto especialmente interesante. La producción mundial en 2018 fue de 91,75 millones de toneladas, del que un 19,74% se destinó a uso como combustible alternativo, ya sea mezclado con gasolina (13,22%), transformado en dimetil-eter como sustituto del diésel (3,25%), o utilizado para la producción de biodiésel (3,28 %) [410]. Además, como veremos más adelante, el metanol es una fuente muy importante para la producción de plásticos y productos químicos.

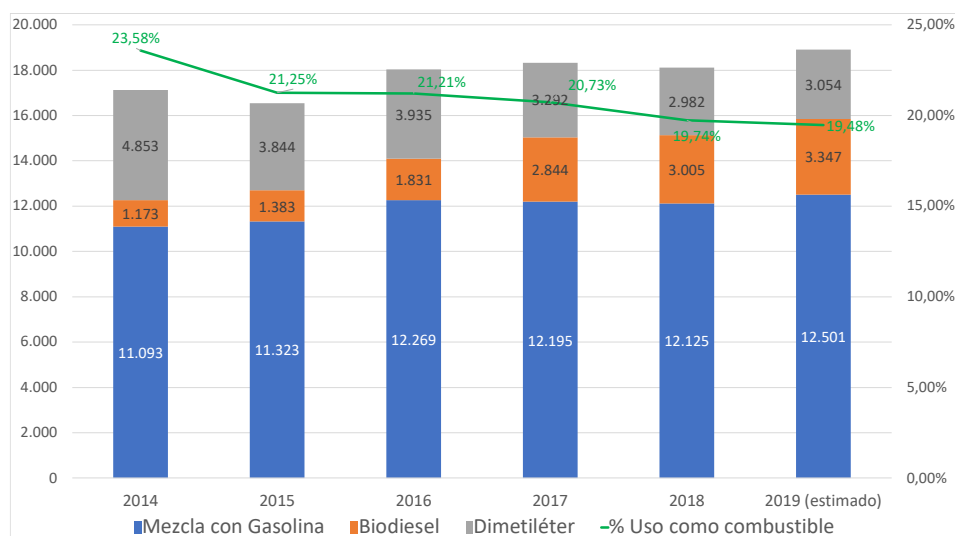
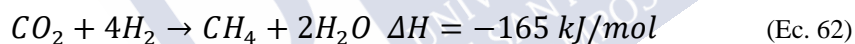


Figura 134: Uso del metanol como combustible (en miles de toneladas y porcentaje de metanol producido usado como combustible). Elaboración propia a partir de [410]

Además de la obtención de combustibles líquidos descritos hasta ahora, conocidos de forma genérica como *Power-to-Liquids* (PtL), está la producción de gases a partir de fuentes de energía eléctrica renovable, ya sea excedentes de producción o producción dedicada (PtG, *Power-to-Gas*). Estos gases son fundamentalmente hidrógeno y metano. La producción de hidrógeno ya se ha descrito como sustancia necesaria para el gas de síntesis en el proceso de Fisher-Tropsch. En el caso del metano, y en particular en el caso de estudio de la utilización de dióxido de carbono, el proceso sería a partir de la metanización del CO_2 , a partir de la reacción de Sabatier:



Esta reacción puede realizarse tanto por metanación catalítica o biológica. En el caso de la metanación catalítica, esta se realiza a alta temperatura, entre 200 y 700 °C y presiones de entre 1 y 100 bar. La metanación biológica produce metano a partir de hidrógeno y CO_2 mediante microorganismos en condiciones anaeróbicas en disolución acuosa a temperaturas de entre 20 y 70 °C [404]. El resultado de los procesos *Power-to-Gas* puede tener dos usos fundamentales: La incorporación de los gases a la red de transporte y distribución de gas natural y su uso directo como combustible. En el caso del hidrógeno parece que su destino más viable es su uso directo como combustible en medios de transporte pesado a larga distancia y para la producción de calor en aplicaciones industriales. La inyección del hidrógeno en la red de gas natural puede realizarse, pero tiene limitaciones técnicas. A nivel técnico el contenido de hidrógeno en la red estaría limitado a un 5% ya que niveles superiores pueden no ser compatibles con determinados almacenamientos de gas y pueden causar problemas en componentes de acero de la red de gas o en los vehículos de gas [404]. En el caso del metano su uso pasaría por su inyección en la red de gas, aunque en este caso el inconveniente es económico ya que el metano producido es entre 3 y 5 veces más caro que el gas natural [411]. En definitiva, la producción de hidrógeno mediante electricidad renovable (ya sea por instalaciones dedicadas o por utilización de excedentes de producción renovable) combinándola con el proceso de Fischer-Tropsch supondría un elemento mitigador de emisiones netas de CO_2 muy importante (Figura 135).

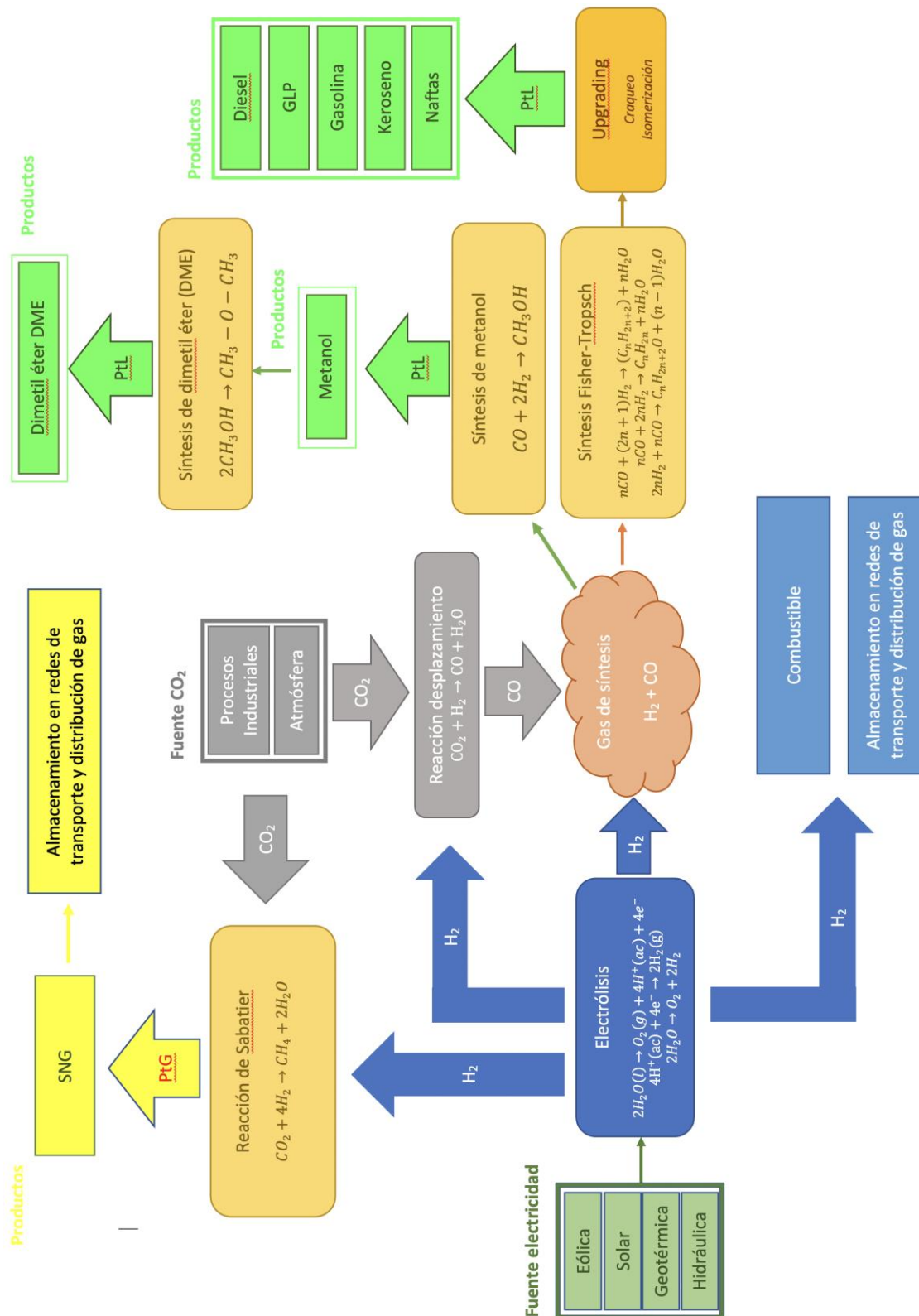
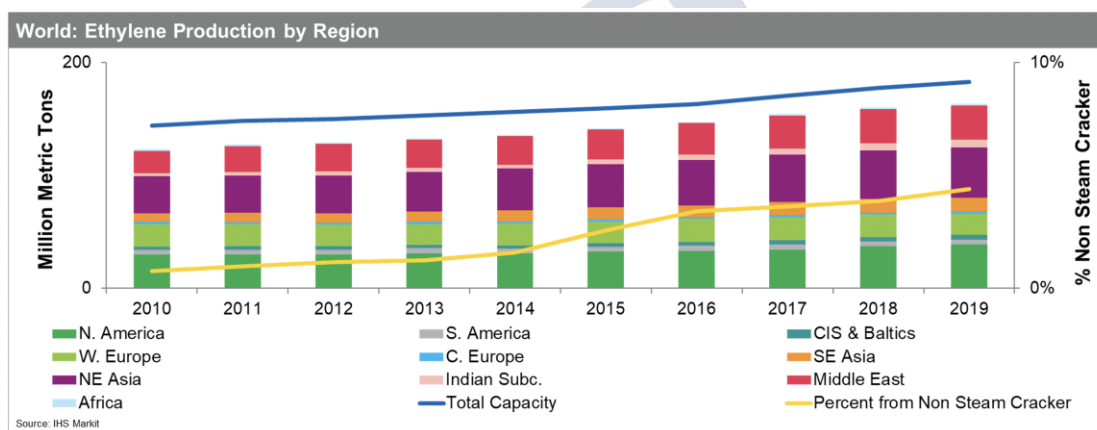


Figura 135: Procesos *Power-to-Liquids* (PtL) y *Power-to-Gas* (PtG) (elaboración propia)

5.2.3.4. Uso del CO₂ para la obtención de polímeros

Los plásticos son uno de los materiales más utilizados en el mundo en todos los ámbitos y en todas las actividades, por lo que su producción supone una cantidad enorme. En el año 2015 en el mundo se produjeron 322 millones de toneladas, que en 2016 se incrementó hasta las 335 Mt. Solo en Europa (UE28, noruega y suiza) la producción en 2016 fue de 60 Mt, aumentando en 2 Mt respecto al año anterior [412].

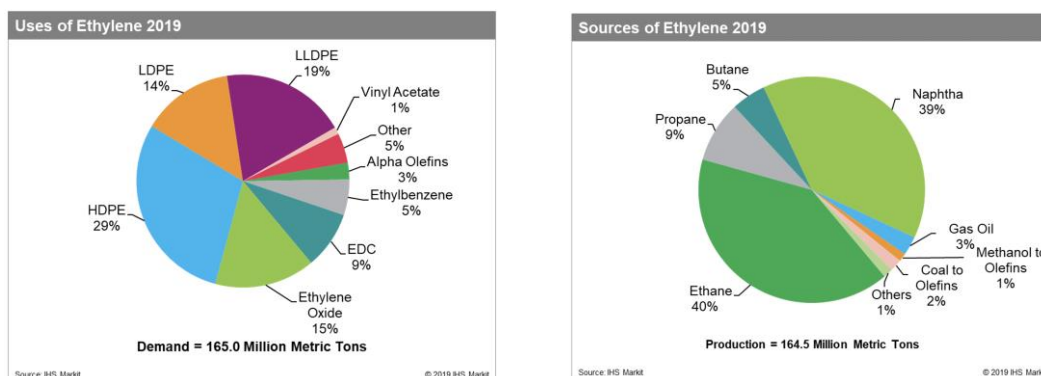
La mayor parte de los plásticos utilizados en el mundo se obtienen a partir de los alquenos etileno (C₂H₄) y propileno (C₃H₆). Por ejemplo con la polimerización del etileno se obtiene el polietileno (PE (CH₂-CH₂)_n), que es una poliolefina que constituye uno de los plásticos más utilizados en todo el mundo en sus diferentes variantes: polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). Además a partir del etileno se obtienen también policloruro de vinilo (PVC, (C₂H₃CL)_n), tereftalato de polietileno (PET, (C₁₀H₈O₄)_n) y poliestireno (PS, (C₈H₈)_n) [413]. También se utiliza en forma de óxido (C₂H₄O) para la esterilización de material quirúrgico y para la obtención de etilenglicol que a su vez se utiliza en la industria textil, como anticongelante y en la producción de fibra de vidrio. En realidad existen muchas aplicaciones de derivados del óxido de etileno [414] [415].



© 2020 IHS Markit. All Rights Reserved

Fuente: IHS Markit

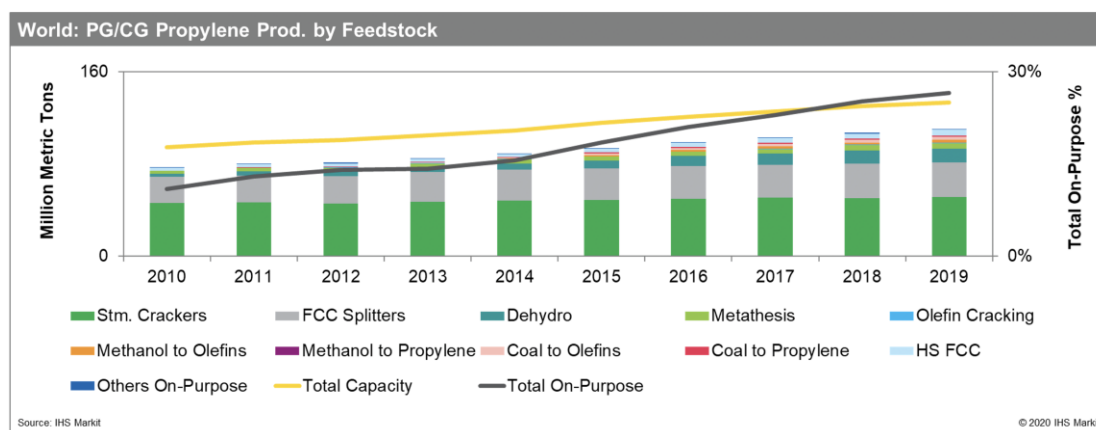
Figura 136: Producción mundial de etileno y proyecciones a partir de 2016



Fuente: IHS Markit

Figura 137: Usos y fuentes del etileno

Con el propileno se obtiene otro de los plásticos más utilizados en el mundo, polipropileno ((C₃H₆)_n). También acrilonitrilo (C₃H₃N) para goma sintética y óxido de propileno (C₃H₆O) [413] que es un químico altamente reactivo con el que se obtienen productos como polioles poliéteres (espumas flexibles o rígidas) y glicoles propilénicos (aditivos alimentarios, excipientes, anticongelantes, productos para descongelamiento en aviones e infraestructuras [416] y como componente de otros plásticos como las resinas de poliéster insaturado (UPR) [417].



Fuente: IHS Markit

Figura 138: Producción mundial de propileno y fuentes

Existen dos vías fundamentales para la obtención de estas olefinas:

Por un lado, el craqueo al vapor de nafta u otros hidrocarburos (sobre todo etano) mediante el que se obtiene la práctica totalidad tanto del etileno como del propileno, en este último caso como uno de los principales subproductos del craqueo al vapor del propano [413], del craqueo catalítico fluidizado (FCC, *Fluid Catalytic Cracking*) con el que se obtienen las olefinas a partir del petróleo [418], o en menor medida de la deshidrogenización del propano. En este caso la nafta se obtendría a partir de la síntesis de Fischer-Tropsch (Figura 135).

Por otro lado, el proceso conocido como metanol a olefinas (MTO, *Methanol To Olefins*). Este es otro de los aspectos que hacen destacable el proceso de obtención de metanol a partir de CO₂, como ya se indicó anteriormente en el apartado correspondiente a los combustibles, ya sea mediante el proceso catalítico por el que se obtiene actualmente el metanol a partir del gas de síntesis, pero este obtenido por a partir del CO₂, por su transformación en monóxido de carbono, y la obtención de H₂ mediante electrólisis mediante energía eléctrica renovable, o bien, en el momento en el que el catalizador adecuado esté disponible, mediante la reacción de hidrogenación directa del CO₂. La producción de diversos hidrocarburos a partir del metanol fue desarrollada por ExxonMobil utilizando un catalizador de zeolita sintética ZSM-5 (*Zeolita Socony Mobil 5*), aunque con una baja selectividad para el etileno para ser viable a nivel industrial. Sin embargo el descubrimiento de un nuevo catalizador basado en una zeolita silico-alumino-fosfato (SAPO-34) proporcionó la selectividad necesaria para su uso industrial [419] debido al menor tamaño de los poros, que restringen la difusión de hidrocarburos pesados

y complejos, su geometría y su acidez que disminuye la aparición de subproductos parafínicos [413].

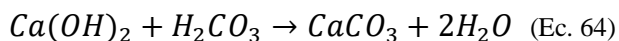
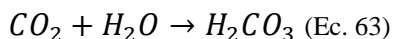
Por otro lado, el metanol puede ser oxidado a formaldehído y a partir de este se obtiene el polioximetileno (POM, acetal, poliacetal, resina acetálica o poliformaldehído). Este se caracteriza por su rigidez, bajo coeficiente de fricción y resistente a las tensiones, por lo que se ha utilizado como sustituto de piezas metálicas en dispositivos de precisión.

5.2.3.5. Mineralización - Carbonatación mineral

Mediante la mineralización o carbonatación mineral el CO_2 reacciona con óxidos metálicos para formar carbonatos. Este proceso tiene lugar de forma natural, pero de forma extremadamente lenta, con tiempos a escala geológica. Estos carbonatos son insolubles lo que supone un almacenamiento permanente libre de riesgos de fugas.

El proceso de carbonatación mineral puede tener lugar *in situ*, de forma muy similar al almacenamiento geológico de CO_2 [365], pero en lugar de utilizar yacimientos de hidrocarburos improductivos o acuíferos salinos, la inyección del gas se realiza sobre depósitos minerales apropiados situados a al menos 700 m de profundidad [420] de forma que reacciona directamente sobre la roca. La elección del tipo de depósito mineral es importante porque afectará a la velocidad a la que tendrá lugar el proceso, de forma que si el depósito está compuesto por rocas formadas por silicatos ricos en cationes metálicos divalentes, como el calcio y el magnesio, como sucede por ejemplo en los basaltos, el proceso será más rápido que si se trata de otras rocas porosas donde la reacción no se vea tan favorecida [421].

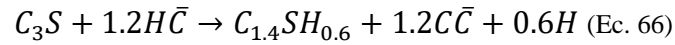
Además de la inyección de CO_2 en depósitos minerales existen desarrollos comerciales de inyección en hormigón durante su fabricación, de forma que al inyectarlo en estado líquido reacciona con los iones Ca^{2+} de la mezcla formando partículas de carbonato cálcico (CaCO_3). Con esto, además de la captura del CO_2 , también se mejora la resistencia a la compresión del hormigón y se requiere menos cemento para su producción [422]. Este proceso de carbonatación no debe confundirse con la carbonatación del hormigón debido a su exposición a la intemperie en largos períodos de tiempo, que se produce por la reacción del CO_2 atmosférico con el agua existente en los poros del hormigón creando ácido carbónico que reacciona con el hidróxido de calcio presente en el hormigón maduro transformándolo en carbonato cálcico [423]:



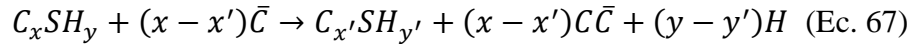
Una vez que desaparece el hidróxido de calcio, el hormigón se acidifica llegando a un pH de 8 desde valores adecuados superiores a 13 cuando está completamente carbonatado provocando la corrosión del armado [423]. En la carbonatación rápida que tiene lugar durante la fabricación del hormigón al introducir el CO_2 las reacciones que se producen son las siguientes [424]:

En primer lugar se produce la formación de ácido carbónico al reaccionar el CO_2 con el agua, para a continuación ionizarse en H^+ , HCO_3^- y CO_3^{2-} , lo que provoca una caída

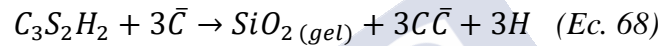
del pH normalmente de 11 a 8. El ácido carbónico provoca en los 3 primeros minutos una fuerte reacción exotérmica con los componentes del cemento del hormigón: C₃S (3CaO·SiO₂, Alita) y C₂S (2CaO·SiO₂, Belita). En ambos casos son similares; para C₃S:



A partir de esos 3 minutos tiene lugar la carbonatación de la pasta C-S-H, que cambia su composición [424]:



Después de estos sucede una carbonatación posterior con lo que la pasta C-S-H queda completamente descalcificado y transformado en carbonato cálcico y un silicagel altamente polimerizado [424]:



Siendo, en las reacciones anteriores:

$\bar{C} = \text{CO}_2$, $C = \text{CaO}$, $S = \text{SiO}_2$, $H = \text{H}_2\text{O}$, $C_3S = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$.

Aunque también en este caso tiene lugar una reducción de pH, según los desarrolladores del proceso, la carbonatación realizada al inicio no impide que el calcio presente se hidrate para formar el hidróxido de calcio que elevará el pH a medida que el hormigón madura [425] (Figura 139).

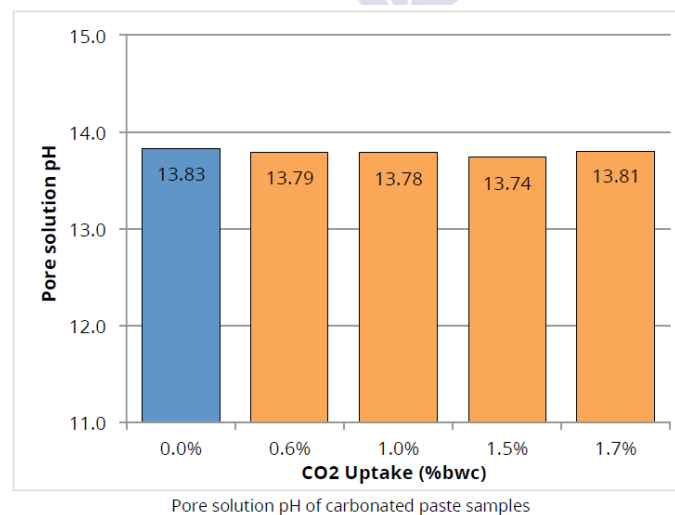


Figura 139: pH tras 28 días de maduración del hormigón sin CO₂ (azul) y con diferentes aportaciones de CO₂ [425]

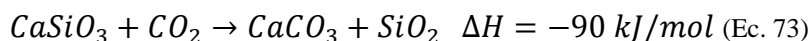
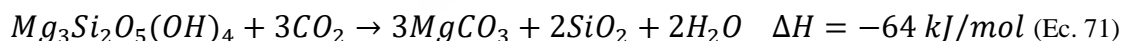
Por otro lado, la carbonatación mineral puede tener lugar *ex situ*, de forma que el proceso tiene lugar en una planta de carbonatación mineral en la que se hace reaccionar el CO₂ con óxidos metálicos presentes en silicatos previamente extraídos mediante

minería y pretatados para facilitar la reacción posterior [365]. El proceso *ex situ* permite que, desde el punto de vista de la mitigación de las emisiones de CO₂, la carbonatación mineral tenga dos vertientes. Por un lado, el simple almacenamiento del CO₂ devolviendo los minerales carbonatados a la mina de la que fueron extraídos los silicatos, y por otro lado, que ese almacenamiento suponga además la obtención de sustancias y productos que puedan ser utilizados en otros procesos dándole un valor añadido a la mineralización. Desde un punto de vista energético, el proceso puede resultar engañoso. Las reacciones del CO₂ con los óxidos de magnesio y calcio (los dos metales cuyos óxidos son los más adecuados para la mineralización ya que disponen de la alcalinidad necesaria para la reacción con el CO₂ [426]) son exotérmicas, por lo que no solo no requieren aporte energético sino que liberan calor:



Aunque las reacciones de carbonatación son exotérmicas, el problema es la velocidad de las reacciones ya que no es suficiente para que sean viables a nivel industrial, por lo que es necesario aplicar calor, presión y procesos químicos y mecánicos que tienen elevados costes energéticos e impactos ambientales [400].

Normalmente los óxidos no están aislados en la naturaleza y forman parte de silicatos como la serpentina (Mg₃Si₂O₅(OH)₄), olivino (Mg₂SiO₄) y wollastonita (CaSiO₃). La disponibilidad de estas rocas no supone un problema ya que existen grandes cantidades en muchas partes del mundo [420] lo cual es importante debido a que las cantidades necesarias de roca son importantes. Las reacciones, aunque con menor desprendimiento de calor, siguen siendo exotérmicas y para estos silicatos son las siguientes [365]:



Estos procesos pueden ser tener lugar de manera directa, de forma que la extracción del metal del mineral y la precipitación del carbonato sucede de forma simultánea en el mismo reactor con presiones elevadas, o bien de forma indirecta en la que se producen sucesivas reacciones hasta alcanzar la mineralización (Tabla 70) [426] [400]. Esto es necesario, por ejemplo, en el caso de que el producto resultante vaya a ser destinado para utilización, ya que en los pasos intermedios son eliminadas las impurezas que no deben estar presente en el carbonato (Tabla 71) [400].

Tabla 70: Comparación de las reacciones en los procesos directos e indirectos de carbonatación.
Fuente: Autor a partir de [363], [426]

Tipo de mineralización	Reacciones
Directa	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 3CO_2 \rightarrow 3MgCO_3 + 2SiO_2 + 2H_2O$ (Ec. 74)
Indirecta	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 6HCl \rightarrow 3MgCl_2 + 2SiO_2 + 5H_2O$ ($T = 100\text{ }^{\circ}C$) (Ec. 75)
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgCl(OH) + HCl + 5H_2O$ ($T = 250\text{ }^{\circ}C$) (Ec. 76)
	$2MgCl(OH) \rightarrow Mg(OH)_2 + MgCl_2$ ($T = 80\text{ }^{\circ}C$) (Ec. 77)
	$Mg(OH)_2 + CO_2 \rightarrow MgCO_3 + H_2O$ ($T = 375\text{ }^{\circ}C, P_{CO_2} = 20\text{ atm}$) (Ec. 78)

Tabla 71: Composición de los silicatos y ratio de kg de mineral necesario por kg de CO₂ capturado
(Condiciones óptimas de carbonatación)
Elaboración propia a partir de [400]

	MgO (wt%)	CaO (wt%)	R _{CO2} (kg mineral/kg CO ₂)	Producto Carbonat. kg	Condiciones óptimas de carbonatación			
					T (°C)	CO ₂ P (atm)	Disolución Acuosa	Carbonatación (1h %)
Olivino	57,3	0	1,6	2,6	185	150	0,64 M NaHCO ₃ , 1 M NaCl	49
Serpentina	40-48	0	2,3-3,6	3,3-4,7	155	115	0,64 M NaHCO ₃ , 1 M NaCl	74
Wollastonita	0-1	43-48	2,6		100	40	Agua destilada	82

Se han desarrollado también otros procesos comerciales (Solidia) mediante los cuales el CO₂ no solo queda capturado, sino que se utiliza durante el proceso de fabricación del hormigón sustituyendo al agua en el proceso de curación. Con ello se obtienen prefabricados como baldosas, tejas, adoquines, durmientes de vías férreas, etc., en los que el proceso de curado se reduce de los 28 días en el caso del hormigón basado en cemento Portland hidratado a máximos de 24 horas mediante este proceso [427]. En este caso no se utiliza como agente de unión el cemento Portland, sino un desarrollo propio basado en silicatos de calcio. Hay que tener en cuenta que el hormigón producido de esta manera no podría ser utilizado en aplicaciones que requiriesen su armado, ya que la reacción que tiene lugar es la ya indicada en el que el silicato reacciona con el dióxido de carbono para dar carbonato cálcico y dióxido de silicio y dado que la rapidez en la que se produce el curado con CO₂ en lugar del uso de agua no permite una hidratación que produzca el hidróxido que suba el pH a los niveles necesarios de forma que no corrompan los armados, como se había visto que sucedía simplemente añadiendo CO₂ al proceso tradicional de fabricación del hormigón. En este caso el dióxido de carbono almacenado estaría entre 220 kg-236 kg por tonelada [427].

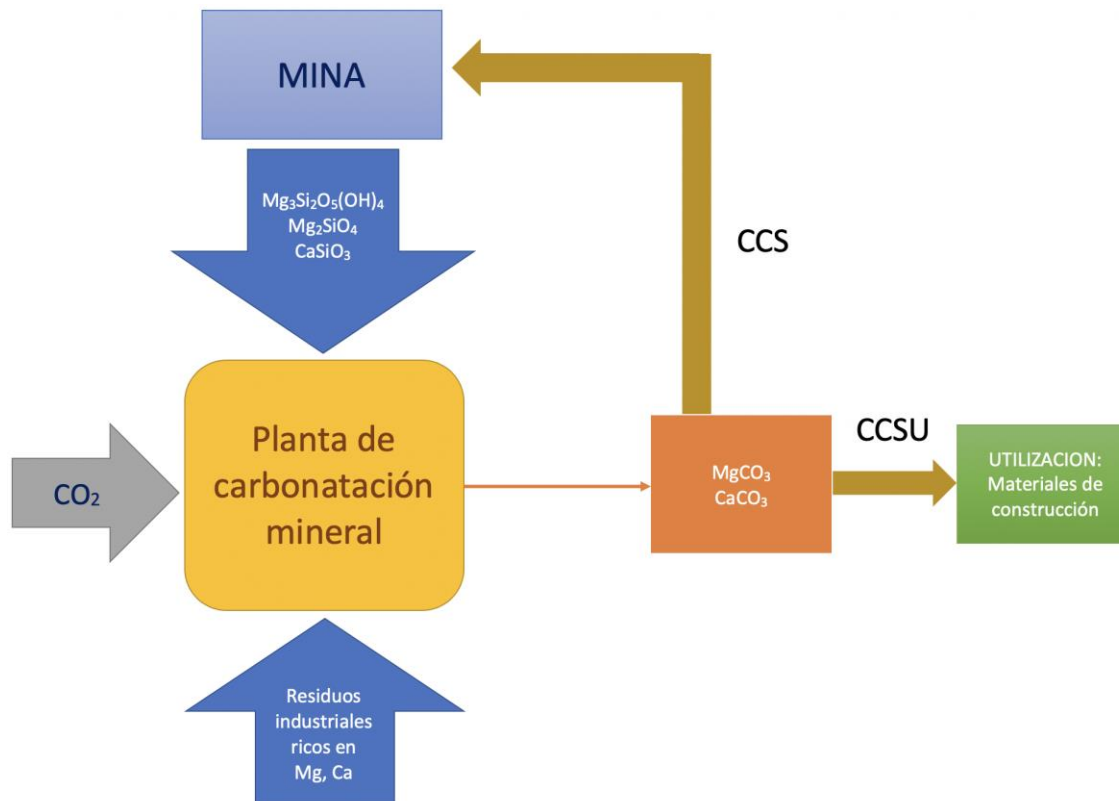
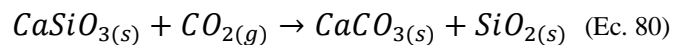
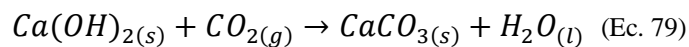


Figura 140: Proceso de carbonatación mineral *ex situ* (elaboración propia)

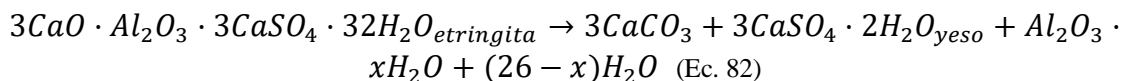
Uno de los aspectos que hace interesantes la carbonatación mineral es que no solo puede utilizar los silicatos de magnesio y calcio naturales. Existen procesos industriales cuyos materiales de desecho son ricos en estos metales, sobre todo en calcio, por lo que dichos desechos podrían ser susceptibles de ser utilizados en procesos de carbonatación. La presencia de calcio en estos residuos está presente tanto en forma de hidróxido (porlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), silicatos, como la ya mencionada wollastonita (CaSiO_3) y en mucha menor medida sulfatos como la etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Las reacciones de carbonatación serían las siguientes [421]:



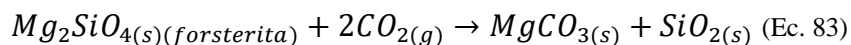
O, en general, para cualquier Ca-silicato:



Para la etringita:



En el caso de los residuos el magnesio está mucho menos presente que el calcio y lo está generalmente en forma de forsterita (Mg₂SiO₄), cuya reacción de carbonatación sería [421]:



Entre los desechos utilizables están (1) escorias procedentes de la fabricación de acero, (2) polvo de horno de cemento (CKD, *Cement Kiln Dust*), (3) cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos, (4) barros rojos procedentes de la extracción de aluminio [420], (5) suelos contaminados, (6) residuos procedentes del control de la contaminación del aire (APCr, *Air Pollution Control Residues*), (7) lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales, (8) polvos de cantera y minería [428]. Una vez aplicado el proceso el material carbonatado podría ser utilizado comercialmente como agregado o árido ligero en la construcción y en la fabricación de materiales de construcción [428].

5.3. DISCUSIÓN

Además de en otras actividades industriales como la producción de cemento y amoniaco y la industria del acero, para la producción de energía eléctrica a medio e incluso largo plazo es necesario la utilización de combustibles fósiles que complementen la variabilidad de una producción renovable que, aunque está en aumento, seguirá requiriendo del respaldo de tecnologías de producción más estable y predecible que garantice la seguridad energética necesaria en la sociedad. El consenso científico, político e incluso social de la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono por su efecto sobre el clima hace necesario el despliegue de infraestructuras que permitan la mitigación de estas emisiones, primero capturando el dióxido de carbono para posteriormente utilizarlo de forma que en la medida de lo posible quede secuestrado la mayor cantidad de tiempo posible. Existen en la actualidad tecnologías de captura maduras (post y pre-combustión), que sin embargo tienen serios inconvenientes sobre todo desde el punto de vista de sus necesidades energéticas, por lo que su evolución futura pasaría por las innovaciones necesarias en los procesos para reducir estas necesidades. El apoyo a las tecnologías de captura a lo largo del tiempo ha sido bastante irregular. Desde el conservacionismo y el ecologismo la captura ha sido vista con mucho escepticismo debido a que por un lado se veía como una tecnología que prolongaba en el tiempo el uso de combustibles fósiles y por otro, sobre todo en el ámbito del almacenamiento, se tenían muchas dudas acerca de los efectos sobre la seguridad natural debido a las posibles fugas en los depósitos utilizados como almacenes, ya sean yacimientos petrolíferos y/o de gas ya explotados, depósitos salinos presentes en la corteza terrestres, etc., así como se incidía en los inconvenientes del gran consumo energético de la tecnología [429], [430]. Sin embargo, la realidad es que en todas las previsiones la utilización de combustibles fósiles tiene todavía un importante recorrido (con tecnologías tan afectadas como el carbón con previsiones de incremento a largo plazo en algunas zonas del planeta en economías en desarrollo y todavía con presencia mayoritaria como energía primaria para la producción eléctrica en países del este de Europa) y es necesario establecer medidas de mitigación de emisiones y después del informe del IPCC de 2018 [366] así como la publicación de los objetivos de la Unión Europea para 2050 [107] en donde se manifiesta la necesidad de disponer de tecnologías de captura esta ha vuelto a la actualidad. Esto no quiere decir que en este intervalo se hayan dejado de realizar o finalizar proyectos de captura a gran escala,

ya que estos grandes proyectos tienen un desarrollo temporal e inversiones económicas elevadas que no permiten su paralización por la mayor o menor sensibilidad social o política respecto al asunto. En este sentido en 2019 se alcanzó el número de 51 instalaciones a gran escala en todo el mundo [431].

A nivel prospectivo, además de las innovaciones necesarias para las tecnologías consolidadas, los retos están en el desarrollo de las tecnologías de biomasa asociadas a la captura (BECCS) teniendo en cuenta el necesario equilibrio entre su enorme potencial y un uso racional y adecuado de los grandes recursos necesario para proveer de materia prima a la industria y a sus posibles efectos tanto en el ámbito de la seguridad natural por los posibles cambios de usos de suelo, en particular suelos forestales, para el cultivo de especies anuales compatibles con las tecnologías energéticas de biomasa, como posibles efectos perjudiciales a nivel social y económico por el desvío de cosechas a la industria energética o por el abandono de producción alimentaria por especies destinadas a la producción de energía.

Otra tecnología cuyo desarrollo a medio plazo podría convertirle en un agente reductor de dióxido de carbono atmosférico es la captura directa del aire. Esta tecnología está todavía en sus inicios, pero la prospectiva de reducción de precios a medio plazo junto con la modularidad del diseño de los equipos, que permiten adecuar su tamaño a las necesidades de las instalaciones emisoras, así como facilidad de instalación en diversos lugares, hacen de este un sistema con posibilidades de desarrollo futuro.

El uso del CO₂ en procesos industriales es algo habitual desde hace décadas. En este sentido hemos visto ejemplos de ello, de forma que el CO₂ capturado puede ser utilizado. El reto de la utilización es que esta pueda hacerse de forma que suponga un almacenamiento de esta sustancia el tiempo suficiente como para que contribuya de forma general a un escenario de reducción o camino hacia la neutralidad de emisiones. Hemos visto su uso como agente de recuperación terciaria de petróleo, de forma que una vez realizada esta función, el dióxido de carbono pueda quedar secuestrado en el yacimiento. Esto requiere de las evaluaciones necesarias para comprobar la posibilidad de fugas que, si en el caso de yacimientos *onshore* puede verse reducido el almacenamiento, en el caso de los yacimientos *offshore* además puede causar efectos perjudiciales como la acidificación de las aguas en el entorno del yacimiento o incluso en otras zonas por el efecto de las corrientes.

Un aspecto muy interesante de la utilización del dióxido de carbono es la obtención a partir de él de monóxido de carbono que, una vez mezclado con hidrógeno y obtenido el gas de síntesis, mediante la síntesis de Fischer-Tropsch se pueden obtener diferentes hidrocarburos que en algunos casos pueden ser utilizados como combustibles y en otros casos como elementos precursores para la obtención de polímeros.

Por último, hemos visto también como mediante la carbonatación mineral, podemos obtener tanto materiales de construcción, como secuestro permanente de CO₂, así como la utilización de este como aditivo del hormigón para la mejora de sus propiedades.

5.4. CONCLUSIONES

La intervención antropogénica en el ciclo del carbono mediante las emisiones a la atmósfera de CO₂ es el factor más importante para la generación del efecto invernadero que, según el consenso científico actual, es el causante del calentamiento global que ha provocado un cambio climático de consecuencias impredecibles en función del camino que se recorra para su gestión. Aunque este es el efecto más grave sobre la seguridad natural, no es el único, ya que parte del CO₂ emitido a la atmósfera es disuelto en el agua de los océanos, provocando su acidificación lo que provoca efectos sobre la vida marina. En estos momentos la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se encuentra

en máximos conocidos (412 ppm en noviembre de 2019) y los objetivos no son ya evitar el calentamiento global, sino limitarlo a un aumento de 2°C respecto a niveles preindustriales, recomendando limitar el aumento a 1,5°C. Esta última recomendación está reforzada por el informe del IPCC de 2018 en el que advierte que, aunque los efectos del aumento a 1,5°C se apreciarán de una manera más intensa que los efectos que vemos en la actualidad, serían mucho más graves en el caso de un aumento de 2°C.

Por lo tanto, es necesario limitar las emisiones a la atmósfera, por un lado, mediante el uso de tecnologías energéticas descarbonizadas y por otro capturando todo el CO₂ posible de las actividades que realicen emisiones. En este sentido existen ya procesos disponibles para la captura, tanto antes como después de la combustión, con unos requerimientos energéticos elevados, e incluso la captura de dióxido de carbono atmosférico, a través de biomasa o suelo, aunque estos últimos con menor desarrollo y unos costes muy elevados sobre todo a nivel energético. También se está investigando la captura directa del CO₂ mediante procesos químicos, pero los requerimientos energéticos son todavía más elevados que en los casos anteriores debido a la menor concentración del dióxido de carbono en el aire respecto al existente en los gases de combustión.

El uso del dióxido de carbono en procesos productivos no es algo novedoso ya que lleva muchos años siendo utilizado como hemos visto en los casos de la producción de urea y la extracción terciaria de petróleo, pero su utilización mediante CO₂ capturado es una herramienta de mitigación de emisiones relevante. En este sentido cabe explorar por tanto nuevas utilidades para el CO₂ y, dado su contenido en carbono, la obtención de hidrocarburos, ya sean combustibles o polímeros, puede ser una importante vía de mitigación dado el uso masivo que se hace de ellos. Su uso para la producción de hidrocarburos acercaría el proceso a la neutralidad de emisiones y su uso en polímeros supondría un almacenamiento con un horizonte temporal largo.

6. CONCLUSIONES

En esta tesis se han estudiado los aspectos de seguridad relacionados con las interacciones entre las infraestructuras energéticas, el uso de la energía y la explotación de recursos minerales y energéticos en el medio ambiente y la sociedad, definiéndolos como seguridad natural.

El estudio se ha realizado teniendo en cuenta las interconexiones existentes en la sociedad a nivel mundial resultado de los procesos de globalización que tuvieron lugar en los últimos años al calor del desarrollo de las tecnologías de la información y de la comunicación y que se han intensificado y continuarán haciéndolo en el futuro inmediato a medida que estas tecnologías continúan con una evolución de característica exponencial.

La seguridad es una cuestión esencial para la sociedad, pero el alcance del concepto ha ido evolucionando con el tiempo para alcanzar cada vez más espacios dentro de las sociedades de forma que a medida que la seguridad va ocupando estos espacios se van alcanzando mayores niveles de desarrollo humano, prosperidad, desarrollo científico y tecnológico e instituciones fuertes y justas, todo ello en un marco en el que se persigue la sostenibilidad. En definitiva, la seguridad es uno de los pilares fundamentales de la democracia. Lamentablemente esta no es ni mucho menos la situación en todas las sociedades del planeta, pero los fenómenos globalizadores, con su componente homogeneizador, ayudan a transmitir estos valores por todo el mundo y los resultados ya se están haciendo notar en forma de crecimiento económico mundial y en unos mejores índices de desarrollo humano respecto a décadas precedentes. Sin embargo, estos procesos globalizadores tienen desafíos muy importantes relacionados con la seguridad. La redistribución de la riqueza mundial que producen genera deslocalizaciones industriales desde los países desarrollados hacia los países en desarrollo (deslocalizaciones externas, con el traslado de la producción e internas con la inmigración), y es uno de los factores que en los últimos años ha favorecido que potencias tradicionalmente globalizadoras como Estados Unidos y el Reino Unido hayan virado a posiciones más proteccionistas y nacionalistas. Esto a su vez tiene un fuerte componente geoestratégico, en el sentido de que en la medida en la que Estados Unidos renuncia a espacios de liderazgo mundial estos van a ser recogidos por otros. Aunque Rusia ha mostrado una importante resiliencia en las últimas décadas no está en condiciones de asumir liderazgos mundiales. En lo que respecta a la Unión Europea, aunque es un importantísimo espacio económico, las diferencias entre los Estados miembros le impiden actuar como un único bloque a nivel mundial, lo que a nivel geoestratégico le impide ejercer un liderazgo mundial, más allá del que ejerce contra el cambio climático de una manera hasta ahora cómoda. Está por ver si en el futuro próximo puede mantener la cohesión suficiente sobre este tema entre sus Estados miembros si, como han anunciado, se quieren intensificar las medidas contra el cambio climático. La forma de gestionar esta profundización en la transición energética será fundamental, ya que algunos miembros tienen una enorme dependencia del carbón y muchos de ellos del gas. Por lo tanto, los espacios de liderazgo mundial que abandone o pierda Estados Unidos serán ocupados por China con su propio modelo globalizador que, aunque a nivel económico se haya

liberalizado a nivel democrático es muy pobre, lo que supone un riesgo para las libertades a nivel mundial.

Otro de los desafíos de la globalización son los modelos de desarrollo y crecimiento. La adopción del modelo occidental de desarrollo por parte de buena parte del resto del mundo hace que los países en desarrollo reproduzcan el modelo occidental basado en el gran consumo energético y de recursos naturales. Esto es especialmente preocupante en un momento en el que el consenso científico internacional alerta del cambio climático y de la gravedad de sus consecuencias. Que incluso el cumplimiento del Acuerdo de París en su margen más elevado de aumentos de temperatura inferiores a 2°C supondrán efectos graves por lo que el IPCC recomienda firmemente el límite de un aumento de 1,5°C respecto a los niveles preindustriales, encontrándonos en estos momentos en aumentos de en torno a 1°C. El grave problema climático ha venido a unirse a otros problemas más antiguos no resueltos como la contaminación que adquiere especial gravedad en el caso de la contaminación del aire, causante de un elevado número de muertes prematuras al año, así como problemas de salud ya que el 90% de la población respira aire con niveles de contaminantes superiores a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud, así como la acidificación del medio ambiente, tanto en el océano como en zonas contaminadas de la superficie a través de la lluvia ácida, creando graves problemas en el medio ambiente.

Esta lucha contra el cambio climático ha venido a incorporarse como un elemento globalizador más ante lo que se podía apreciar como cierto agotamiento del modelo globalizador tanto a nivel de reequilibrio económico mundial como a nivel geoestratégico afectando a las posiciones de liderazgo. En lo que respecta al reequilibrio económico, las asimetrías en los requisitos del Tratado de París serían un elemento fundamental en este reequilibrio. En este sentido podría verse la posición pública de China respecto a la lucha contra el cambio climático como una palanca de reposicionamiento global que le permita avanzar en su posición de liderazgo mundial no solo a nivel económico, sino también a nivel geoestratégico. La posible alternativa de China a la ocupación de los espacios de liderazgo que pueda ceder Estados Unidos estaría en la Unión Europea. En estos momentos, y a la vista de lo sucedido en los últimos años, esto se ve como imposible. La Unión Europea es un bloque económico potente debido a su tamaño y a la capacidad adquisitiva de sus habitantes. Pero incluso la calificación de bloque económico es muy deficiente. Las enormes diferencias entre los países del norte y del sur de Europa, que ya se pusieron de manifiesto en las medidas adoptadas tras la crisis económica de 2008, que en muchos casos responden a importantísimas diferencias culturales, de concepción de la sociedad, de incomprensión entre diferentes modelos socioeconómicos e incluso de prejuicios entre diferentes modelos de sociedad y que supusieron una enorme afectación en la población de algunos países miembros, se han vuelto a reproducir ante la respuesta que debe dar la Unión Europea ante la más que previsible crisis económica que seguirá a la pandemia de COVID-19. Esta ausencia de cohesión invalida a la Unión Europea como una potencia que pueda aspirar a ocupar posiciones que Estados Unidos o el Reino Unido (fuera ya de ella) puedan dejar libres en la posición global. Es más, posiblemente, por lo menos de forma más inmediata, una de las consecuencias de la actual pandemia podría ser un retroceso en los procesos globalizadores ante las enormes dificultades con los que estos procesos y sus agentes han afrontado las fases iniciales de la pandemia y será determinante su actuación en lo que respecta a sus consecuencias económicas y sociales. A pesar de estos probables retrocesos, el camino ya andado en el proceso globalizador es improbable que se deshaga en gran medida y la posición de liderazgo mundial de los Estados Unidos sigue apoyada tanto por su enorme poder militar, su actuación homogénea a nivel mundial a pesar de sus diferencias sociales y territoriales internas, su

todavía principal influencia económica y política mundial, su gran disponibilidad de recursos, tanto minerales como, sobre todo, energéticos y su capacidad de adaptar su liderazgo interno a la situación en cada momento a través del relevo de su gobierno en elecciones, herramienta de la que no dispone ni la Unión Europea (cuyos Estados y ciudadanos priorizan el interés del Estado miembro sobre el del bloque) ni China.

Además de los problemas ambientales, otro grave problema asociado son los conflictos derivados de la explotación de recursos. En la actualidad es difícil establecer una conexión directa entre los efectos del cambio climático y los conflictos, pero la relación entre recursos naturales y conflictos está muy documentada causando graves problemas de seguridad, ya sea por los conflictos derivados del control de dichos recursos, por los problemas derivados del reparto de los beneficios generados por los recursos, o porque su explotación sirve como financiación de conflictos. Además de conflictos violentos de mayor o menor intensidad también en muchos casos se relaciona la existencia de recursos naturales con la generación de conflictos de delimitación que pueden generar tensiones entre países con consecuencias difíciles de prever en muchos casos. Existen otros efectos muy negativos de la falta de seguridad natural. El consenso científico apunta a que la presencia de eventos meteorológicos adversos se ha intensificado en frecuencia y gravedad como consecuencia del cambio climático. A lo largo de la historia esto ha supuesto graves afecciones a la población y el año 2018 se saldó con 17,2 millones de desplazados por desastres naturales de los cuales 16,1 millones fueron debidos a eventos meteorológicos. Esto hace imprescindible poner el foco en la gestión de los impactos de la seguridad natural, de forma que las buenas prácticas de gobierno y la introducción de políticas de sostenibilidad en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible sirvan para planificar políticas de adaptación a los cambios que eviten la generación de conflictos reforzando las instituciones. En este sentido es necesario que las políticas de adaptación tengan en cuenta los efectos sobre la industria y las actividades existentes para evitar en primer lugar que nadie se quede atrás por los efectos de estas políticas y en segundo lugar, que los posibles conflictos derivados de su puesta en práctica creen un estado de opinión contrario a la necesaria adaptación que pueda provocar retrasos en su puesta en funcionamiento o incluso situaciones de involución. De esta forma, también es importante resaltar el peligro de la ideologización de los aspectos relacionados con la seguridad natural, de forma que, por el simple hecho de que un determinado bloque social los adopte como propios, en una sociedad tan polarizada como la actual, el bloque social opuesto puede minusvalorar los efectos de los impactos o eternizarse discusiones entre bloques acerca de la forma más adecuada de afrontarlos. Otro aspecto relevante de cara a la opinión pública es el riesgo de trivialización que determinadas acciones encuadradas en algunos ámbitos del activismo pueden generar. El activismo es fundamental en una sociedad tan influenciable como la nuestra, pero los excesos pueden ser contraproducentes. En este sentido las instituciones asociadas a los procesos globalizadores tienen un papel fundamental a la hora de transmitir adecuadamente el estado real de la situación y las consecuencias derivadas de los impactos de diferentes escenarios basándose en el conocimiento científico y modulando la transmisión del mensaje de forma que se eviten excesos que puedan ser contraproducentes.

Un buen marco efectivo de comunicación de los impactos de la seguridad natural podría basarse, además de en una transmisión modulada de las posibles consecuencias de carácter catastrófico, en aspectos más inmediatos y cercanos. En este sentido se puede citar los aspectos económicos asociados al medio ambiente, encuadrados en el concepto de capital natural, los aspectos relacionados con cuestiones básicas para la sociedad como es su propia seguridad y sus componentes como la seguridad nacional y energética dentro

de los cuales podríamos enmarcar conceptos como la dependencia energética y tecnológica, la equidad en el acceso a la energía y la seguridad de las infraestructuras tanto en el ámbito físico como informático, ya sea debido a incidentes, accidentes o acciones deliberadas.

Todo esto nos detalla una visión interrelacionada de aspectos de gobernanza, de comunicación social de seguridad natural, de seguridad energética y de sostenibilidad, que precisa ser gestionada en todos los sectores de la sociedad y en todos los ámbitos tecnológicos. Todo ello comprende los recursos energéticos, el transporte de la energía, su transformación, utilización y sus infraestructuras. A modo de casos de estudio, en este trabajo se han elegido tres diferentes, que el autor entiende que tienen gran impacto sobre la seguridad natural: la distribución de electricidad, los recursos minerales y energéticos marinos y la captura y utilización de CO₂.

La distribución de electricidad tiene un gran impacto sobre la seguridad natural. En términos novedosos una de las principales líneas de actuación en la lucha contra el cambio climático es el incremento en la electrificación de la sociedad que disminuya en lo posible las tecnologías energéticas basadas en combustibles fósiles. De esta forma, la red de distribución tendrá que adaptarse a varias situaciones. Por un lado, el incremento de la demanda debido a la incorporación de consumos que hasta ahora están alimentados por otras tecnologías energéticas (climatización, movilidad, etc.). Por otro lado, la presencia de recursos energéticos distribuidos conectados a diferentes puntos de la red de distribución (pequeña y mediana producción eléctrica, sistemas de almacenamiento de energía, microrredes, sistemas de gestión de la demanda y de eficiencia energética,...), lo que requerirá por un lado adaptaciones tecnológicas tanto en lo que respecta a la capacidad de las redes como al incremento de su automatización y digitalización para poder hacer gestionable el cambio de una red que en la actualidad es mayoritariamente unidireccional, es decir, la energía se transmite mayoritariamente de la red a los consumidores conectados hacia una situación con diferentes flujos energéticos en diferentes situaciones, debido en gran parte a la variabilidad de la producción renovable y a las pautas de demanda de energía de los consumidores conectados a la red. Esta digitalización lleva asociada desafíos relacionados con las vulnerabilidades de las tecnologías de la información y comunicación a los ciberataques. En definitiva, se trata de establecer un sistema flexible formado por las propias redes de distribución, la producción conectada a ella (convencional o renovable), sistemas de almacenamiento, sistemas de control (alimentados por sensorización, tecnologías asociadas al tratamiento masivo de datos, sistemas de predicción meteorológica, de comportamiento de mercados energéticos y de materias primas e incluso de ciclos económicos), unidos a los ámbitos de gobernanza que aportan el marco regulatorio (teniendo en cuenta tanto la seguridad nacional, como la seguridad energética, la seguridad natural y la sostenibilidad).

Sin embargo, el impacto de la distribución de electricidad en la seguridad natural no se circunscribe exclusivamente a las cuestiones más novedosas, sino que hay aspectos que desde hace tiempo suponen impactos relevantes para la seguridad natural. Desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero, una tecnología que está presente en la distribución de electricidad desde hace años y que ha supuesto una mejora fundamental en lo que se refiere a la seguridad y eficiencia de las operaciones y de las infraestructuras son los elementos de maniobra y protección de la red que tienen como agente de extinción del arco eléctrico al hexafluoruro de azufre (SF₆), uno de los gases de efecto invernadero más potentes con un GWP de 23.500. Sin embargo, las características del uso de este gas en esta actividad requieren su confinamiento de forma permanente, por lo que en sí misma la actividad no realiza emisiones de este gas y las que puedan

producirse son las relacionadas con un mal funcionamiento de los equipos, por accidentes o incidentes o bien por operaciones de vaciado o rellenado de gas, que en concreto en el ámbito de la distribución eléctrica son poco frecuentes. De hecho, del total de las emisiones de gases de efecto invernadero que tuvieron lugar en España en 2018 únicamente el 0,08% fueron de SF₆. Esto no quiere decir que, dado el potencial de efecto invernadero del gas, no sea necesario la existencia de procedimientos para su manipulación y para la retirada de los equipos que contienen el gas. A pesar de que existen investigaciones para la identificación de sustancias que sustituyan al SF₆, tanto el nivel de implantación actual, como la necesidad anteriormente indicada de una mayor automatización de la red hace prever un fuerte incremento de la presencia de dispositivos con esta tecnología por la adaptación de instalaciones antiguas para cuya automatización es preciso sustituir los equipos actuales por equipos dotados de motorización, que, en la actualidad en el caso de la distribución primaria y secundaria, están mayoritariamente equipados con dispositivos de corte en SF₆.

Otro aspecto que tradicionalmente ha vinculado la distribución eléctrica con la seguridad natural es la presencia de biomasa (bosques y arbolado) en el entorno de las redes, que en caso de afecciones de biomasa incorrectamente gestionada (presencia de arbolado o vegetación que incumple los parámetros reglamentarios) unida a acciones de elementos meteorológicos como viento o tormentas, o incidentes derivados de actuaciones de corte de arbolado o movimiento de maquinaria, de incidentes en la red o en la combinación de varios de estos factores puede causar incendios forestales. Esta situación se ha visto agravada por la intensificación de los períodos cálidos, tanto en el ámbito temporal como en los aspectos de temperatura y humedad del aire. La presencia masiva de arbolado en el entorno de las líneas aéreas de distribución supone un reto importante, tanto para la seguridad natural como para la seguridad energética. Los eventos meteorológicos adversos suponen importantes afecciones sobre la continuidad del suministro, sobre todo por la caída de arbolado sobre las redes en casos de fuertes vientos. Existen otro tipo de incidentes que, si se dan las condiciones, también pueden ser causas de incendios forestales. Es el caso de la electrocución de aves. Esta situación, unida a la evidente necesidad de protección de la biodiversidad, hace que sea necesario el establecimiento de medidas que impidan la electrocución y la colisión de aves contra los elementos de la red de distribución. Como podemos ver, muchos de los aspectos relacionados con la seguridad natural y energética en la distribución eléctrica están relacionados con el carácter aéreo de buena parte de las redes de distribución, por lo que todos los pasos que se den en el desarrollo de infraestructuras subterráneas irán en la dirección de mejorar estos aspectos de seguridad. En este sentido nos encontramos con las grandes diferencias de costes entre los sistemas aéreos y subterráneos y aunque en muchos de los nuevos desarrollos se opta por la instalación subterránea (ya sea por una mayor agilidad en las gestiones respecto a la necesidad de permisos de propietarios en el caso aéreo o por regulaciones sectoriales), la gestión de los miles de kilómetros aéreos existentes sigue siendo necesaria.

En lo que respecta a los recursos energéticos y minerales, todos los modelos predicen un incremento en el consumo de energía y en la industrialización del planeta. Estos crecimientos no tendrán lugar de forma homogénea, siendo los países en desarrollo los que protagonizarán estos mayores incrementos, frente a los países desarrollados con crecimientos económicos más modestos y con el establecimiento de medidas de eficiencia energética que harán moderar el crecimiento de la demanda energética e incluso su disminución. Por otro lado, el desarrollo de nuevas tecnologías requiere de un mayor uso de recursos minerales, tanto convencionales como de nuevo uso. La necesidad de acceso

a estos minerales para garantizar el desarrollo tecnológico y la producción masiva de los nuevos sistemas ha llevado a la creación de registros de materias primas críticas por parte de las instituciones de gobierno. Como es sabido, la presencia de los recursos naturales no es uniforme en todo el planeta, y esto no es diferente en el caso de las materias primas críticas, lo que crea situaciones de dependencia de unos países sobre otros y es una fuente potencial de cambios geopolíticos. De esta forma, en la actualidad el principal poseedor de recursos asociados a las materias primas críticas es China, lo cual puede reforzar su posición geopolítica en el mundo. En el caso de occidente, la presencia mayoritaria de materias primas críticas es mucho menor (Francia en el caso del hafnio (Hf) y Estados Unidos con el Berilio (Be). Existen también casos preocupantes de poseedores de materias primas críticas debido a la presencia de conflictos en su territorio como es el caso de la República Democrática del Congo, que a la presencia problemática de otros recursos se une una importante presencia de Cobalto (Co).

Como solución tanto a la posición dominante en este sentido por parte de determinados países como a la posible escasez de determinados recursos se plantea su extracción en el océano. En lo que respecta a los recursos minerales marinos, estos se encuentran fundamentalmente en tres formas: nódulos polimetálicos, sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto. En todos ellos la presencia de materias primas críticas es lo suficientemente elevada como para considerar su explotación, que indudablemente, por las características de su ubicación, supondrá un gran desafío tecnológico. La extracción de recursos energéticos en el mar no es algo nuevo. Desde hace décadas se extrae petróleo y gas natural, conocida como actividad *offshore* que supone en torno al 25% de la producción de petróleo y gas natural, con fuertes incrementos de producción en este último. Esto hace que en la actualidad esta actividad sea fundamental para la seguridad energética. Pero en la revisión del estado del arte de esta actividad hemos podido comprobar los importantes desafíos sobre la seguridad natural en todas sus fases, desde los impactos sobre la biodiversidad de la exploración sísmica, los impactos sobre el medio marino por las modificaciones mecánicas de las perforaciones y del establecimiento de infraestructuras hasta los graves daños ambientales derivados de los accidentes que causan derrames de petróleo. Las condiciones en las que se desarrolla esta actividad, con profundidades que van desde las correspondientes a la plataforma continental a miles de metros ha supuesto un desarrollo tecnológico enorme, que como hemos visto, puede ser aprovechado en la explotación de nuevas formas de energía como es el caso de la producción eólica *offshore*, que está en pleno desarrollo. El gran desafío actual es el desarrollo de infraestructuras flotantes que permitan el establecimiento de los parques en aguas profundas. El gran conocimiento procedente de la producción de hidrocarburos *offshore* hace prever que tanto los riesgos (tecnológicos y económicos) como los tiempos de desarrollo tecnológico sean menores. El desarrollo de esta tecnología es muy importante ya que el recurso es mucho más intenso y estable que el que existe en la eólica terrestre. Otro de los recursos no convencionales presente en grandes cantidades en el océano es el gas natural en forma de hidratos de gas, presente en sedimentos marinos, en taludes continentales y en todos los continentes a profundidades que oscilan entre 500 y 2000 m. También se encuentra en el permafrost del ártico. Aunque en la actualidad no hay una producción relevante, es un recurso que se encuentra disponible y podría ser una fuente de este gas para países que no cuenten con otros yacimientos y que necesiten incrementar su independencia energética.

Existen importantes desafíos relacionados con la seguridad en la explotación de los recursos minerales y energéticos marinos. A los aspectos geopolíticos asociados a los recursos naturales, es necesario considerar en este sentido los conflictos de delimitación

existentes derivados de las reclamaciones territoriales sobre el mar, en la mayoría de los casos debido a la presencia de estos recursos. Otro aspecto relacionado con la seguridad en esta actividad son los episodios violentos que tienen lugar, ya sea por acciones criminales como la piratería o las acciones derivadas de conflictos bélicos sobre infraestructuras que pueden causar gravísimos problemas ambientales.

El último caso de estudio analizado en este trabajo es la captura y utilización del dióxido de carbono. Desde los inicios de las preocupaciones de los efectos del cambio climático esta tecnología se vio como posible herramienta de mitigación de emisiones. Sin embargo, los grandes costes de las infraestructuras, las necesidades energéticas de algunos de los procesos, las dudas sobre algunas formas de almacenamiento del gas y el temor por parte del activismo ambiental de que se convirtiera en una forma de prolongación del uso de los combustibles fósiles hicieron que el interés por esta tecnología decayera. Sin embargo, el informe del IPCC de 2018 sobre la necesidad de focalizarse en alcanzar el objetivo de incremento máximo de temperatura de 1,5°C que hace necesario un incremento en los esfuerzos de mitigación han vuelto a poner de actualidad esta tecnología, de forma que su uso permite diferentes grados de mitigación: reducción de emisiones, neutralidad en las emisiones e incluso emisiones negativas. Hasta ahora los grandes procesos de captura del dióxido de carbono se centran, como es natural en los grandes emisores: la producción eléctrica mediante la combustión de combustibles fósiles, la producción de cemento, acero, etc. En este sentido la captura se realiza capturando y separando posteriormente en dióxido de carbono de los gases de combustión mediante procesos químicos, tratando el combustible para la eliminación previa del carbono antes de su combustión, o realizando la combustión en presencia de oxígeno casi puro, de forma que el gas de la combustión está formado es una proporción muy elevada por CO₂. Estas son importantes herramientas de mitigación ya que ningún modelo predice el abandono a nivel mundial de los combustibles fósiles a medio e incluso largo plazo, lo que hace de estas unas herramientas muy útiles de mitigación. Un desafío tecnológico importante son las tecnologías de emisiones negativas, que serían las únicas que podrían reducir la presencia de dióxido de carbono en la atmósfera. La bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂, las repoblaciones forestales y las reforestaciones, el almacenamiento de CO₂ en el suelo y la captura directa del aire son desafíos tecnológicos que es necesario explorar si algún día queremos disminuir la presencia del dióxido de carbono en la atmósfera.

Una vez capturado el dióxido de carbono, los caminos son el secuestro o almacenamiento permanente del gas o bien su utilización de forma que también quede almacenado el mayor tiempo posible. La utilización del CO₂ a nivel industrial se lleva realizando durante décadas en diferentes procesos, pero el reto está en su utilización de nuevas aplicaciones que permita en primer lugar incrementar la cantidad de gas utilizada y en segundo lugar el tiempo en el que el CO₂ queda almacenado en la atmósfera. Ejemplo de utilización intensiva de dióxido de carbono es la producción de urea y su uso en la extracción terciaria de petróleo como última técnica que permite en la actualidad la máxima extracción del recurso en el yacimiento. Esto también permite que, una vez extraído el recurso, el gas pueda quedar secuestrado en el yacimiento y no se libere a la atmósfera. En este sentido existen dudas acerca de las posibles filtraciones que, en el caso de los yacimientos marinos pueden causar problemas de acidificación de las aguas que, a su vez tiene impactos sobre la biodiversidad. Otra de las aplicaciones de la utilización del dióxido de carbono es la obtención de hidrocarburos a partir de este gas. En teoría, mediante la hidrogenación directa del gas se pueden obtener diferentes sustancias. Sin embargo, la necesidad de la presencia de un catalizador eficaz que descienda los niveles

de energía del dióxido de carbono, dada la baja reactividad de este es un inconveniente que hace que por el momento únicamente existan producciones menores de metanol. El proceso que de forma más inmediata se ve con mayor viabilidad es la obtención de los hidrocarburos a través del gas de síntesis mediante la síntesis de Fischer-Tropsch. El gas de síntesis formado por la mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono se obtendría, por un lado, a partir del CO_2 , del que mediante la reacción de desplazamiento de agua se obtendría el monóxido de carbono y el hidrógeno se obtendría a partir de electrólisis con electricidad a partir de fuentes renovables. A partir de los hidrocarburos obtenidos en la síntesis podemos tener tanto combustibles, que supondría una neutralidad en el uso del combustible, como polímeros con los que se pueden fabricar plásticos. En este caso el período en el que el dióxido de carbono permanece secuestrado es mucho mayor que en el caso de los combustibles. Otra forma de utilización del dióxido de carbono con un secuestro prolongado del gas es la mineralización o carbonatación mineral que acelera los procesos que tienen lugar de forma natural, pero con tiempos a escala geológica, en un proceso por el que el dióxido de carbono reacciona con óxidos metálicos para formar carbonatos por la inyección del gas en depósitos minerales o con minerales extraídos de minas lo que permite su utilización como materiales de construcción. También es posible su utilización como aditivo en el hormigón, lo que mejora sus propiedades de resistencia mecánica y secuestra el gas durante un período de tiempo muy largo. En cualquier caso, los procesos de utilización del CO_2 deben someterse a técnicas de evaluación del ciclo de vida para comprobar sus impactos ambientales.

Esta tesis ha tratado de estudiar los aspectos relacionados con la seguridad en los procesos de extracción y utilización de la energía y los recursos naturales en un marco de sostenibilidad en una sociedad global con múltiples intereses. Actualmente desde el punto de vista occidental no cabe otro desarrollo que no sea sostenible, pero hemos de ser conscientes de que, a pesar de la mejora en las últimas décadas en los índices de desarrollo humano, la situación en gran parte del mundo está muy lejos de ser así. Además de las consecuencias más o menos graves de los impactos individuales de los aspectos relacionados con la seguridad natural, el consenso científico nos habla de una amenaza sin precedentes sobre nuestra forma de vida, sobre el medio y sobre la biodiversidad a consecuencia de la forma en la que utilizamos los recursos y la energía. Sin embargo, la humanidad siempre se ha adaptado a las nuevas situaciones y en esta ocasión también habrá de hacerlo. Debemos también confiar en el progreso científico y tecnológico, por lo que es necesario dotar de recursos los programas e investigaciones en materia energética. En definitiva, todo este panorama podría sufrir grandes cambios con desarrollos como la tecnología nuclear de fusión.



REFERENCIAS

- [1] J. J. Fernandez Rodriguez, «La hiperglobalización y su impacto», Cuadernos de estrategia, Nº 199 P. 83-118, 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZccudG>.
- [2] Presidencia del Gobierno. Departamento de Seguridad Nacional, «Estrategia de Seguridad Nacional 2017», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/31WivNw>.
- [3] The White House, «National Security Strategy of the United States of America», Dic 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gMEcUb>.
- [4] The White House, «National Security Strategy», Feb 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BKXYkr>.
- [5] J. Diaz Rodriguez, «La Política Común de Seguridad y Defensa de la UE: una renovada estrategia para un nuevo escenario europeo y global», Instituto Español de Estudios Estratégicos. Documento de Opinión, 31 May 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2O6DRj0>.
- [6] El País, «Vuelo MH17», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iFD32C>. [Último acceso: 22 Dic 2019].
- [7] Ministère des Armées, «European intervention initiative - Letter of Intent», [En línea]. Available: <https://bit.ly/31ZG6g7>. [Último acceso: 25].
- [8] Unión Europea, «Tratado de la Unión Europea - Versión Consolidada», 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iLL46i>.
- [9] European Union External Action, «Cooperación Estructurada Permanente (CEP)», Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gIVJgi>.
- [10] J. J. Fernandez Rodriguez, «Los límites al acceso a la información en España: A propósito del terrorismo», Revista Española de la Transparencia, Nº 5, p. 131, 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fhR3gX>.
- [11] CESEG - Centro de Estudios de Seguridad. Universidade de Santiago de Compostela, *Actas de la reunión Tormenta de Ideas sobre Horizonte 20-40 en temas de Seguridad y Defensa entre el CESEG de la Universidad de Santiago de Compostela y el Centro de Estudios Estratégicos del Ministerio de Defensa, Seguridad Natural y Seguridad Energética*, Santiago de Compostela, 19 Jun 2017.
- [12] El País, «Cuando la niebla de Londres mató a 12.000 personas», 23 Sep 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W4ZswD>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [13] IqAir AirVisual, «2018 World Air Quality Report. Region & City PM2.5 Ranking», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iMFoc7>.
- [14] United Nations Environment Programme, «Towards a Pollution-Free Planet», Sep 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iLhLj>.
- [15] El País, «Dos muertos en las protestas por la subida de la gasolina en Irán», 16 Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3egIKSg>. [Último acceso: 27 Dic 2019].

- [16] RTVE, «Cinco personas han muerto en Ecuador durante las protestas contra Moreno por la subida del combustible», 10 Oct 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZTjFqf>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [17] Amnistía Internacional, «Zimbabue: Escalada de la represión de las protestas por la subida drástica del precio de los combustibles, con cientos de detenciones», 15 Ene 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CicTSU>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [18] El País, «Macron cede ante los ‘chalecos amarillos’ y suspende el alza del impuesto a los carburantes», 4 Dic 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CpsKyX>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [19] Europa Press, «El rey de Jordania ordena la congelación de la subida del combustible ante el temor a nuevas protestas», 1 Jun 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3flshwE>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [20] El País, «Dimite el primer ministro de Haití tras protestas por la subida del combustible», 14 Jul 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iOt6zR>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [21] El País, «La gasolina prende el descontento en Brasil», 30 May 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3frZoPr>. [Último acceso: 27 Dic 2019].
- [22] EY, «Navigating geopolitics in oil and gas. Business solutions for a complex world», 2014. [En línea]. Available: <https://go.ey.com/2Ocz5Rg>.
- [23] The White House, «Statement by Presidente Trump on the Paris Climate Accord», 01 Jun 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iFJTtoO>.
- [24] U.S. Department of State, «On the U.S. Withdrawal from the Paris Agreement», 04 Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CiPW1V>.
- [25] U.S. Department of State. Office of Global Change, «United States National Statement at UNFCCC COP25», 11 Dic 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Ogwky1>.
- [26] We are still in, «Who's In», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oc2T0g>. [Último acceso: 16 Dic 2019].
- [27] Embajada de Francia en Chile, «Llamado de Beijing sobre la preservación de la biodiversidad y el cambio climático», Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRM1RL>. [Último acceso: 20 Dic 2019].
- [28] United Nations Framework Convention on Climate Change, «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Texto de la Convención», 1992. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38FTAz7>.
- [29] United Nations Framework Convention on Climate Change, «Parties and Observers», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AIAN9G>. [Último acceso: 20 Dic 2019].
- [30] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Informe sobre Desarrollo Humano 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2VZ9gbu>.
- [31] Expansión / Datosmacro.com, «PIB de China», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gJ9gV3>. [Último acceso: 20 Dic 2019].
- [32] BBVA, «China, una economía que reduce su crecimiento y su exposición al mundo», 05 Sep 2019. [En línea]. Available: <https://bbva.info/2ZSDT3A>. [Último acceso: 20 Dic 2019].
- [33] Climate Action Tracker, «China. Country summary», 2 Dic 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CkLnUO>. [Último acceso: 20 Dic 2019].

- [34] BP, «Statistical Review of World Energy 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://on.bp.com/2Oc6Hi4>.
- [35] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión COM(2019) 640. El Pacto Verde Europeo», 11 Dic 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oc7fo8>.
- [36] Climate Transparency, «Brown to Green. The G20 transition towards a net-zero emissions economy 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W2Qxf0>.
- [37] United Nations Development Group, «Natural Resource Management in Transition Settings», Ene 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gJdITL>.
- [38] P. M. Bello Bugallo, *Petroquímica y tecnología de polímeros*, Notas de clase 5º curso de la Licenciatura en Ingeniería Química, curso 2011-12, Universidade de Santiago de Compostela.
- [39] XLSemanal - Der Spiegel, «Libia, la guerra civil sin fin», 30 Ago 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W593n9>. [Último acceso: 22 Dic 2019].
- [40] W. Puszta, «Lybya's conflict. A very short introduction», European Union Institute for Security Studies, Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZUK5I9>.
- [41] Naciones Unidas (Noticias), «Libia se encuentra a un paso de la guerra civil y amenaza a toda la región», 21 May 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ee1yke>. [Último acceso: 22 Dic 2019].
- [42] M. Freeman y M. Bazilian, «How renewable energy could fuel future conflicts», Georgetown Journal of International Affairs (GIJA), Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ej8kF3>.
- [43] Global Conflict Tracker, «Territorial Disputes in the South China Sea», Council on Foreign Relations, [En línea]. Available: <https://on.cfr.org/3gJ6L5c>. [Último acceso: Dic 2019].
- [44] The Wall Street Journal, «The South China Sea Dispute», 12 Jul 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3efBRPW>. [Último acceso: 26 Dic 2019].
- [45] Congressional Research Service, «Conflict Minerals in Central Africa: U.S. and International Responses», Jul 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gJDbMN>.
- [46] OCDE - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, «Guía de diligencia debida de la OCDE para la gestión responsable de las cadenas de suministro de minerales procedentes de zonas de conflicto y de alto riesgo. Segunda Edición», 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3emcsEF>.
- [47] En Naranja - ING, «Un repaso histórico a la evolución de la economía mundial: así ha crecido el mundo en los últimos 60 años», 26 Mar 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/322nCvq>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [48] United Nations Framework on Climate Change, «Conference of the Parties (COP)», [En línea]. Available: <https://bit.ly/38OPepu>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [49] Naciones Unidas, «¿Cuántos y cuáles son los organismos especializados de la ONU?», 28 Ago 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZSugC2>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [50] Naciones Unidas, «El sistema de las Naciones Unidas», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zbo6h0>.

- [51] Comisión Europea, «2019 Report on Implementation of EU Free Trade Agreements (1 January 2018 - 31 December 2018)», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W5blCL>.
- [52] El Economista, «El fracking es cada vez más barato: abrir un pozo nuevo ya es rentable con el petróleo a 50 dólares», 22 May 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/31Z38E0>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [53] China Africa Research Initiative, «China Africa Research Initiative. Data: Chinese loans to Africa», The Paul H. Nitze School of Advanced International Studies Johns Hopkins University, [En línea]. Available: <https://bit.ly/38GjIK8>. [Último acceso: 13 Oct 2018].
- [54] World Economic Forum, «China's \$900 billion New Silk Road. What you need to know», 26 Jun 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/320OUT3>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [55] Reuters, «Exclusive - China seeks to cement globalisation credentials at Silk Road summit», 26 Abr 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ejaapr>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [56] World Economic Forum, «¿Qué es la Globalización 4.0 y estamos listos para ello?», 07 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eh911P>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [57] World Economic Forum, «Manifiesto de Davos 2020», 02 Dic 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Ocx8nC>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [58] El País, «La Cumbre del Clima fracasa en su objetivo de regular los mercados de carbono», 16 Dic 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38JXFC8>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [59] World Economic Forum, «An open letter from business to world leaders: "Be ambitious, and together we can address climate change"», 29 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iFT4pg>. [Último acceso: 21 Dic 2019].
- [60] L. M. Varela, «Fusión y fisión nuclear, baterías de litio y células de combustible: tendencias actuales y perspectivas en el horizonte 2050», Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN). Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE). Centro de Estudios de Seguridad (CESEG) de la Universidad de Santiago de Compostela., 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iLYpvc>.
- [61] EFDA (European Fusion Development Agreement) - Actualmente EUROfusion, «Fusion Electricity. A roadmap to the realisation of fusion energy», 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gM5EBN>.
- [62] L. Botana Lopez y N. Vilariño del Rio, «Una visión de las toxinas marinas en el horizonte del año 2050 desde la perspectiva del cambio climático, la bioseguridad y la seguridad alimentaria», Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN). Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE). Centro de Estudios de Seguridad (CESEG) de la Universidad de Santiago de Compostela., 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gCx CzE>.
- [63] International Energy Agency, «Energy Security», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZO6FCo>. [Último acceso: 20 Oct 2019].
- [64] C. Winzer, «Conceptualizing energy security», Energy Policy 46, 36–48, 2012. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.067>.

- [65] . B. Ang, W. Choong y T. Ng, «Energy security: Definitions, dimensions and indexes», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015) P. 1077–1093, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>.
- [66] P. M. Bello Bugallo, *Los recursos energéticos del futuro*, Universidade de Verán 2018. RIESGOS NATURALES PARA LA SEGURIDAD: CAMBIO CLIMÁTICO Y TORMENTAS SOLARES, 2018.
- [67] J. Eiras Barca, «Tormentas solares geomagnéticas: la amenaza silenciosa de una sociedad hipertecnológica», Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN). Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE). Centro de Estudios de Seguridad (CESEG) de la Universidad de Santiago de Compostela., 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iOmnpg>.
- [68] J. A. Rodríguez Añón, «La sostenibilidad de los sistemas agroforestales en España en el horizonte 2050», Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN). Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE). Centro de Estudios de Seguridad (CESEG) de la Universidad de Santiago de Compostela., 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gFwb3u>.
- [69] NASA Global Climate Change, «Climate Change: How do we know?», [En línea]. Available: <https://go.nasa.gov/38HXpnj>. [Último acceso: Nov 2019].
- [70] J. Cook y Et al, «Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming», *Environ. Res. Lett.* 11 (2016) 048002, 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321JqYn>.
- [71] NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, «Global Climate Change Indicators. How do we know humans are the primaty cause of the warming?», Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/320AjHe>.
- [72] NASA Global Climate Change, «The Causes of Climate Change», [En línea]. Available: <https://go.nasa.gov/3iPsZnE>. [Último acceso: Nov 2019].
- [73] D. H. Meadows, Meadows, Dennis, J. Randers y W. V. I. Behrens, «The limits to growth. A report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind», Universe Books. New York, 1972. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iObIeQ>.
- [74] The Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC), «Global Report on Internal Displacement. GRID 2019», May 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZO93Jm>.
- [75] Institute for Economics & Peace, «Global Peace Index 2019: Measuring Peace in a Complex World», Jun 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W53TYL>.
- [76] Generalitat Valenciana, «La acidificación del medio ambiente», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gOw8CJ>. [Último acceso: 28 Dic 2019].
- [77] OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development, «Glossary of statistical Terms. Natural Capital», Sep 2001. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gHKk03>. [Último acceso: Nov 2019].
- [78] Natural Capital Coalition., «What is natural capital?», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CfYSFj>. [Último acceso: Nov 2019].
- [79] P. M. Bello Bugallo, *Life Cycle Thinking approach and tools*, Notas de clase. Curso 2017-18. 1er año del Máster Internacional Biomass and Waste for Energy and Materials, IMT Mines Albi-Carmaux. Francia.
- [80] TRUCOST PLC, «Natural capital at risk: The top 100 externalities of bussiness», 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ChcLDc>.

- [81] World Forum on Natural Capital 2017, «What is natural capital?», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/328znjY>. [Último acceso: Nov 2019].
- [82] Natural Capital Coalition, «Natural Capital Protocol», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZgTmLP>. [Último acceso: Nov 2019].
- [83] Natural Capital Coalition, «Natural Capital Protocol», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZgTmLP>. [Último acceso: Nov 2019].
- [84] World Energy Council, «World Energy Trilemma Index 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZMGtYE>.
- [85] Asia Pacific Energy Research Centre, «A quest for energy security in the 21st century. Resources and Constraints», 2007. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OaenkL>.
- [86] Naciones Unidas. Asamblea General, «Resolución A/RES/70/1 de 25 de septiembre de 2015. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fIFaH2>.
- [87] Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible. 7 Energía asequible y no contaminante», [En línea]. Available: <https://bit.ly/38LhYiW>. [Último acceso: 01 Nov 2019].
- [88] International Renewable Energy Agency, «Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050 (2019 edition)», Abr 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AKMqgv>.
- [89] International Energy Agency, «20 renewable energy policy recommendations», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgBupI>.
- [90] IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In press., 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iOqlyA>.
- [91] Comisión Europea, «Estrategia Europea de la Seguridad Energética. COM(2014) 330», 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ed2qW7>.
- [92] RTVE, «La 'guerra' del gas: Cronología del conflicto entre Rusia y Ucrania», 20 Ene 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZgIH3M>. [Último acceso: 19 Oct 2019].
- [93] El País, «El negocio ruso-alemán que enfurece a la UE», 16 Mar 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BUibnP>.
- [94] BBC News, «Nord Stream 2, el gasoducto entre Rusia y Alemania que irrita a Donald Trump y causa divisiones en Europa», 11 Jul 2018. [En línea]. Available: <https://bbc.in/3gIdyvJ>. [Último acceso: 20 Oct 2019].
- [95] El Economista, «Trump amenaza a Berlín con sanciones al gasoducto Nord Stream 2, construido junto a Rusia», 13 Jun 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZdR7bV>. [Último acceso: 20 Jun 2019].
- [96] P. M. Bello Bugallo, *Legislación Química*, Notas de clase. Curso 2018-19. Máster Universitario en Investigación Química y Química Industrial, Universidade de Santiago de Compostela.

- [97] Trans Adriatic Pipeline, «Maps», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DsF16r>. [Último acceso: Nov 2019].
- [98] Comisión Europea, «Estrategia Marco para una Unión de la Energía resiliente con una política climática prospectiva COM(2015) 80», [En línea]. Available: <https://cutt.ly/Qpie8YG>.
- [99] Comisión Europea, «Energy Security-Overview», 20 Ago 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iLUMWf>. [Último acceso: 20 Oct 2019].
- [100] «Directiva (UE) 2018/844», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gN3Bgv>.
- [101] Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, «Acuerdo de París», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/308tTU7>.
- [102] Comisión Europea, «Acuerdo de París», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfIUp2>. [Último acceso: 27 Oct 2019].
- [103] Ministerio para la Transición Ecológica, «Resultados de la COP21», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZcWZCb>. [Último acceso: 27 Oct 2019].
- [104] Comisión Europea, «Clean energy for all Europeans package», 16 Sep 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3famKc1>. [Último acceso: 27 Oct 2019].
- [105] Comisión Europea, «Clean energy for all Europeans package completes: good for consumers, good for growth and jobs, and good for the planet», 22 May 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZbiovI>. [Último acceso: 27 Oct 2019].
- [106] Comisión Europea, «Projects of common interest-Interactive map», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AKxDSR>. [Último acceso: Nov 2019].
- [107] Comisión Europea, «Comunicación COM(2018) 773. Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38JnGM>.
- [108] Ministerio para la Transición Ecológica, «Marco Estratégico de Energía y Clima: una oportunidad para la modernización de la economía española y la creación de empleo», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Od0aUl>. [Último acceso: 06 Abr 2019].
- [109] Presidencia del Gobierno, «Anteproyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gLxihY>.
- [110] Ministerio para la Transición Ecológica, «Borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030», Ene 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/308vrgT>.
- [111] Ministerio para la Transición Ecológica, «Borrador de la Estrategia de Transición Justa», 2019. [En línea].
- [112] Red Eléctrica de España, «Las energías renovables en el sistema eléctrico español», Jun 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38SRhsJ>.
- [113] IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «PNIEC en el Blog de Luzi@», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZbKFIL>.
- [114] Presidencia del Gobierno - Departamento de Seguridad Nacional, «Estrategia de Seguridad Energética Nacional», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zej6Z6>.
- [115] Eurostat, «Energy Dependence», 30 Abr 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3feQi8h>. [Último acceso: 03 Nov 2019].

- [116] Eurostat, «Energy from renewable sources. SHARES. SHARES partial provisional results 2018», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZOgzE4>. [Último acceso: 28 Dic 2019].
- [117] Eurostat. RAMON - Reference And Management Of Nomenclatures, «Eurostat's Concepts and Definitions Database. Solid biofuels (excluding charcoal) (Code 5541)», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W31oWl>. [Último acceso: Nov 2019].
- [118] Eurostat. RAMON - Reference And Management Of Nomenclatures, «Eurostat's concepts and definitions database. Municipal waste (renewable) (Code 55431)», [En línea]. Available: <https://cutt.ly/npr1dyH>. [Último acceso: 03 Nov 2019].
- [119] Eurostat. RAMON - Reference And Management Of Nomenclatures, «Eurostat's concepts and definitions database. Geothermal energy (Code 5500)», [En línea]. Available: <https://cutt.ly/Wpr1Kzj>. [Último acceso: 03 Nov 2019].
- [120] K. J. Chalvatzis y A. Ioannidis, «Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy», *Applied Energy* 207 (2017) P. 465–476, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.010>.
- [121] Gobiernos de Azerbaiyán, Georgia, Turquía, Grecia, Albania, Italia, Bulgaria, Croacia, Montenegro, Reino Unido, Estados Unidos y la Unión Europea, «The Second Ministerial Meeting of the Southern Gas Corridor Advisory Council. Joint Declaration. Baku», 29 Feb 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DsLgar>.
- [122] Ministerio para la Transición Ecológica, «Importaciones de gas natural por países», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CmEbHE>. [Último acceso: Nov. 2019].
- [123] S. Fuller y D. McCauley, «Framing energy justice: perspectives from activism and advocacy», *Energy Research & Social Science*, Volumen 11, Ene 2016, P. 1-8, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.08.004>.
- [124] H. Todd y C. Zografos, «Justice for the Environment: Developing a Set of Indicators of Environmental Justice for Scotland», *Environmental Values*, White Horse Press, vol. 14(4), 2005, P. 483-501. [En línea].
- [125] R. J. Heffron y D. McCauley, «Achieving sustainable supply chains through energy justice», *Applied Energy* 123 (2014) P. 435–437, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.034>.
- [126] NREL - National Renewable Energy Laboratory (US Department of Energy), «Certification Procedures for Data and Communications Security of Distributed Energy Resources», Jul 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iR2gaG>.
- [127] CNPIC - Centro Nacional para la Protección de las Infraestructuras Críticas, «Memoria 2016», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38GcgPf>.
- [128] Ministerio del Interior. Secretaría de Estado de Seguridad, «Estudio sobre la cibercriminalidad en España», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iKt1xf>.
- [129] INCIBE - Instituto Nacional de Ciberseguridad, «El Centro de Respuesta a Incidentes de Seguridad para ciudadanos y empresas pasa a denominarse INCIBE-CERT», 01 Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zdtct4>. [Último acceso: 25 Nov 2019].
- [130] CNPIC - Centro Nacional de Protección de Infraestructuras y Ciberseguridad, «Preguntas Frecuentes: ¿Qué es y qué contiene el Catálogo Nacional de Infraestructuras Estratégicas?», [En línea]. Available: <https://bit.ly/38G2PiA>. [Último acceso: 25 Nov 2019].

- [131] CNPIC - Centro Nacional de Protección de Infraestructuras y Ciberseguridad, «Nivel de Alerta en Infraestructuras Críticas (NAIC)», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZV2eWh>. [Último acceso: 25 Nov 2019].
- [132] Ministerio del Interior, «Nivel de Alerta Antiterrorista (NAA)», [En línea]. Available: <http://www.interior.gob.es/es/web/interior/prensa/nivel-alerta-antiterrorista>. [Último acceso: Nov 2019].
- [133] A. Månsson, B. Johansson y L. J. Nilsson, «Assessing energy security: An overview of commonly used methodologies», *Energy* 73 (2014) P. 1-14, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.073>.
- [134] A. Stirling, «Multicriteria diversity analysis. A novel heuristic framework for appraising energy portfolios», *Energy Policy* 38 (2010) P. 1622–1634, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.023>.
- [135] K. Narula y R. B. Sudhakara, «Three blind men and an elephant: The case of energy indices to measure energy security and energy sustainability», *Energy*, 80 (2015) P. 148-158, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.055>.
- [136] World Economic Forum, «Global Energy Architecture Performance Index. Report 2017», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38JkQN9>.
- [137] U.S. Chamber of Commerce. Global Energy Institute, «International Index of Energy Security Risk», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323aTIT>.
- [138] Asamblea General de las Naciones Unidas, «Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo», 4 Ago 1987. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323aTIT>.
- [139] Naciones Unidas, «Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo», Jun 1992. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZduT9U>.
- [140] Comisión Europea, «Comunicación COM(2001)264: Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible», Propuesta de la Comisión ante el Consejo Europeo de Gotemburgo), 2001. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W36Bh0>.
- [141] Naciones Unidas, «Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático», 1998. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BO1bQe>.
- [142] Naciones Unidas, «Enmienda de Doha al Protocolo de Kyoto», 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38I8h4B>.
- [143] K. L. Higgins, «Economic growth and sustainability – are they mutually exclusive?», 16 May 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38FZujP>. [Último acceso: 11 Nov 2019].
- [144] UICN -Unión Mundial para la Naturaleza, «El programa 2005-2008 de la UICN. Muchas voces, una tierra», Nov 2004. [En línea]. Available: <https://bit.ly/322KF9u>.
- [145] United Nations System Staff College, «Understanding the Dimensions of Sustainable Development», 29 Jun 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AKV11t>. [Último acceso: 11 Nov 2019].
- [146] UNESCO, «UNESCO four dimensions of sustainable development», 2010. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2VZv9Yc>.

- [147] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), «Informe de análisis económico-financiero de las principales empresas de distribución del sector eléctrico (21013-2016)», 14 Dic 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321khNb>.
- [148] Ministerio de Industria, Energía y Turismo., «Listado Público de Distribuidoras Eléctricas», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iKwXOx>. [Último acceso: 10 Nov 2019].
- [149] Instituto Energético de Galicia, «Retribución de la distribución de la energía eléctrica: Características diferenciales de Galicia», [En línea]. [Último acceso: 04 May 2015].
- [150] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «ORDEN IET/2660/2015, de 11 de diciembre, por la que se aprueban las instalaciones tipo y los valores unitarios de referencia de inversión, de operación y mantenimiento por elemento de inmovilizado y los valores unitarios de retribución», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BY5SqD>.
- [151] A. L. Orille Fernandez, Centrales Eléctrica (I), Barcelona: UPC, 1993.
- [152] UNESA, La electricidad en España. 313 Preguntas y Respuestas, Madrid: UNESA, 2003.
- [153] Red Eléctrica de España, «El sistema eléctrico español. Avance 2018», Ene 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38HwCHF>.
- [154] Instituto Nacional de Estadística, «Producto Interior Bruto (PIB). Crecimiento en volumen (Revisión Estadística 2019)», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgQN1A>. [Último acceso: 10 Nov 2019].
- [155] Ormazabal, «Transformadores de distribución», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/320ILGp>.
- [156] Ormazabal, «PFU. Envoltente de hormigón para Centros de Transformación», 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgCsm2>.
- [157] R. Capella, «Centros de transformación MT/BT», Publicación Técnica Schneider, 2000. [En línea]. Available: <https://cutt.ly/CptvNHl>.
- [158] Ormazabal, «CGM Cosmos. Sistema modular y compacto (RMU) con aislamiento integral en gas», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRslxz>.
- [159] Siemens, «Integrated solutions for power distribution in commercial and industrial buildings», 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gJK6FE>.
- [160] Siemens, «The GEAFOL Neo: the optimum foundation for power distribution», 2017. [En línea]. Available: <https://sie.ag/3gNvS6V>.
- [161] Pronutec, «Cuadros de distribución para Centros de Transformación», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fhqngb>.
- [162] J. Dupras, C. Patry, R. Tittler, A. Gonzalez, M. Alam y C. Messier, «Management of vegetation under electric distribution lines will affect the supply of multiple ecosystem services», Land Use Policy 51 (2016) P. 66–75, 2014. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.11.005>.
- [163] J. Boyd y S. Banzhaf, «What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units», Ecological Economics, Volumen 63, Issues 2–3, 1 Ago 2007, P. 616-626, 2007. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.002>.

- [164] D. J. Clarke y J. G. White, «Recolonisation of powerline corridor vegetation by small mammals: Timing and the influence of vegetation management», *Landscape and Urban Planning* 87 (2008) P. 108–116, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.04.009>.
- [165] R. Lancia y C. McConnell, «Wildlife management on utility company rights-of-way: results of a national survey», 1976. [En línea].
- [166] K. G. Porteck, A. E. Miller y D. L. Ham, «Comparison of alternative maintenance treatments for an electric transmission right-of-way on steep mountainous terrain», 1995. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CkpN2U>.
- [167] Xunta de Galicia. Consellería do Medio Rural, «Pladiga 2020. Memoria», 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZSgJu1>.
- [168] Xunta de Galicia. Consellería do Medio Rural, «Pladiga 2020. Planos» 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AI0Y0a>.
- [169] «Real Decreto 223/2008 de 15 de febrero por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZVuDxO>.
- [170] «Real Decreto 1955/2000 por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. Texto consolidado», 06 Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZPxaY6>.
- [171] «Real Decreto 842/2002 de 2 de agosto por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión», 18 Sep 2002. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ehs38h>.
- [172] «Ley 3/2007, de 9 de abril, de prevención y defensa contra los incendios forestales de Galicia», 2007. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38F96LC>.
- [173] California Department of Forestry & Fire Protection, «Camp Fire», 25 Oct 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gFQFZW>. [Último acceso: 11 Nov 2019].
- [174] Pacific Gas and Electric Company (PG&E), «Reorganization Information», [En línea]. Available: <https://bit.ly/38F6nSr>. [Último acceso: 11 Nov 2019].
- [175] R. Gold, K. Blunt y R. Smith, «PG&E Sparked at Least 1,500 California Fires. Now the Utility Faces Collapse», *The Wall Street Journal*., 13 Ene 2019. [En línea]. Available: <https://on.wsj.com/2OgWcd7>. [Último acceso: Nov 2019].
- [176] Pacific Gas and Electric Company, «Pacific Gas and Electric Company Amended 2019 Wildfire Safety Plan», 06 Feb 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRowIM>.
- [177] Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, «Los incendios forestales en España. Decenio 2006-2015», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgMVxR>.
- [178] Instituto Galego de Estatística - IGE, «Economía. Os sectores de actividade. Definicións e conceptos teóricos», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iRc7xc>. [Último acceso: Nov 2019].
- [179] Gobierno de España. Ministerio de Economía, «RD 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica (texto consolidado 06/10/2018)», 06 Jun 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323vBZw>. [Último acceso: 01 Nov 2019].

- [180] Ministerio para la Transición Ecológica, «Energía Eléctrica. Calidad del Servicio. Índices Zonales Desagregados», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Ci0fn4>. [Último acceso: 01 Nov 2019].
- [181] IEEE Standards Association, «IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices», 31 May 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fayQlr>.
- [182] NARUC - National Association of Regulatory Utility Commissioners, «Distributed Energy Resources Rate Design and Compensation», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2O9YdrR>.
- [183] energiaysociedad.es, «Resumen RD 900/2015», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Odc68B>.
- [184] MIT Energy Initiative - MIT - ITT Comillas, «Utility of the future», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZWX1NE>.
- [185] IDAE - Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía, «Guía Profesional de Tramitación del Autoconsumo», Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AL14nZ>.
- [186] International Energy Agency, «Status of Power System Transformation 2018. Advanced Power Plant Flexibility», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/31ZtHZK>.
- [187] J. Cochran, M. Miller, O. Zinaman, M. Milligan, D. Arent, B. Palmintier, M. O'Malley, S. Mueller, E. Lannoye, A. Tuohy, B. Kujala, M. Sommer, H. Holttinen, J. Kiviluoma y S. Soonee, «Flexibility in 21st Century Power Systems, 21st Century Power Partnership. Accelerating the transformation of power systems», National Renewable Energy Laboratory, May 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38F7Isr>.
- [188] WKA Alexander Wiegand SE & Co. KG., «Soluciones innovadoras para el ciclo de vida del gas SF6», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zc09X4>.
- [189] Greenhouse Gas Protocol, «Global Warming Potential Values», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3egOzyb>.
- [190] Asociación Nacional de Fabricantes de Bienes de Equipo (SECORBE), «Acuerdo limitación emisiones de hexafluoruro», 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3egBu82>.
- [191] Administración General del Estado. Portal de la Transparencia, «Acuerdo entre el Gobierno, fabricantes, proveedores y usuarios de equipos de SF6 para una gestión integral del uso del SF6 en la industria eléctrica más respetuosa con el medio ambiente», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3efYyU8>.
- [192] Ministerio para la Transición Ecológica. Sistema Español de Inventario de Emisiones, «Metodologías de Estimación de Emisiones. Uso del SF6 en los equipos eléctricos», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2O7RY7K>.
- [193] M. Torres Rodríguez, L. Cristóbal Andrade, P. Bello Bugallo y J. Casares Long, «Combining LCT tools for the optimization of an industrial process: Material and energy flow analysis and best available techniques», Journal of Hazardous Materials, Volumen 192, 3, Sep 2011, P. 1705-1719, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.003>.
- [194] Ministerio para la Transición Ecológica, «Nota informativa sobre el Avance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero correspondientes al año 2018», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OnQ5UN>.

- [195] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 60376:2018 Specification of technical grade sulphur hexafluoride (SF₆) and complementary gases to be used in its mixtures for use in electrical equipment», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gI5N99>.
- [196] International Electrotechnical Commission, «IEC 60480:2019 Specifications for the re-use of sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures in electrical equipment», 04 Abr 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZYyKXA>.
- [197] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 62271-4:2013 High-voltage switchgear and controlgear - Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures», 26 Ago 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fdJiJ2>.
- [198] Ministerio para la Transición Ecológica, «PROT 02 V1.0. Eliminación de residuos de descomposición sólidos de SF₆ de los equipos eléctricos que lo han contenido al final de su vida útil», 28 09 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W2W9WR>.
- [199] C. Prévé, R. Maladen y D. Piccoz, «Validation methods of SF₆ alternative gas», CIRED 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ObMWqN>.
- [200] Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «Fichas Internacionales de Seguridad Química. Yoduro de Metilo», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3e8Sk8M>.
- [201] Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social. Instituto Nacional de la Seguridad Social, «Guía de Ayuda para la valoración de las Enfermedades Profesionales. Segunda Edición», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/328jzOx>.
- [202] C. Prévé, R. Maladen y D. Piccoz, «Application of HFO1234ZEE in MV switchgear as SF₆ alternative gas. 24th International conference and exhibition on electricity distribution (CIRED)», The Institution of Engineering and Technology Journals, 2017. [En línea]. Available: <https://cutt.ly/VptBcCl>.
- [203] C. Prévé, R. Maladen y D. Piccoz, «Method for validation of new eco-friendly insulating gases for medium voltage equipment», Int. Conf. on Dielectrics, 2016. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICD.2016.7547588>.
- [204] The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry, «Technical report on alternative to SF₆ gas in medium voltage & high voltage electrical equipment», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eflHoX>.
- [205] Compañía Sevillana de Electricidad, Iberdrola, Red Eléctrica de España, «Análisis de impactos de líneas eléctricas sobre la avifauna de espacios naturales protegidos. Manual para la valoración de riesgos y soluciones», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eeqoR0>.
- [206] Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, «Resolución del 18 de septiembre de 2018», 01 Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZVes17>.
- [207] Organización Mundial de la Salud, «Campos Electromagnéticos (CEM). ¿Qué son los campos electromagnéticos? Resumen de los efectos sobre la salud», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3feOPPz>. [Último acceso: Nov 2019].
- [208] International Energy Agency, «Offshore Energy Outlook», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oc6aNe>. [Último acceso: 25 Nov 2018].

- [209] Comisión Europea, «COM(2012) 494. Crecimiento Azul. Oportunidades para un crecimiento marino y marítimo sostenible», 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iOzzLq>.
- [210] Comisión Europea, «COM(2014) 8. La energía azul. Medidas necesarias para aprovechar el potencial de la energía oceánica de los mares y océanos europeos hasta 2020 y en adelante», 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zh0s2W>.
- [211] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, «Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38M6dbN>.
- [212] Ente Vasco de la Energía, «Energía Marina», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fePG2J>. [Último acceso: 25 Nov 2018].
- [213] International Energy Agency, «Statistics», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iN5N9P>. [Último acceso: 2017].
- [214] Agencia EFE, «La primera turbina eólica marina de España, instalada en Gran Canaria, promete reducir un 30% los costes», 22 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fktVyo>. [Último acceso: 25 Noviembre 2018].
- [215] South China Morning Post, «China filips the switch on world's biggest floating solar farm», 2 Jun 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ObPepT>. [Último acceso: 25 Nov 2018].
- [216] The Guardian, «World's biggest floating solar farm powers up outside London», 29 Feb 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CpZbgH>. [Último acceso: 27 Nov 2018].
- [217] The Northern Star, «Australia's largest floating solar farm switches on», 30 Ene 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfD1ag>. [Último acceso: 27 Nov 2018].
- [218] Reuters, «Dutch plan to build giant offshore solar power farm», 14 Feb 2018. [En línea]. Available: <https://reut.rs/2ZcIsq8>. [Último acceso: 25 Nov 2018].
- [219] Gobierno de España. Gabinete de la Presidencia del Gobierno. Departamento de Seguridad Nacional, «Estrategia de Seguridad Nacional», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3efx29w>.
- [220] M. Abad Castelos, «Mar, energía y ordenamiento jurídico: seguridad y sostenibilidad como referentes ineludibles para la estrategia de España», Documentos de Seguridad y Defensa 67. Desafíos nacionales en el sector marítimo, Ministerio de Defensa. Instituto Español de Estudios Estratégicos, Feb 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfbuFS>.
- [221] Organización Marítima Internacional (OMI), «Protección Marítima», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323faMM>. [Último acceso: 19 Nov 2018].
- [222] Y. Guillemette y D. Turner, «The Long View: Scenarios for the World Economy to 2060», OECD Economic Policy Paper, Num. 22, Jul 2018, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1787/b4f4e03e-en>.
- [223] Comisión Europea, «Comunicación de la Comisión COM(2014)14 Por un renacimiento industrial europeo», 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3frio04>.
- [224] Naciones Unidas. Asamblea General, «Resolución 70/293 de 25 de julio de 2016. Tercer Decenio del Desarrollo Industrial para África (2016-2025)», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W6fdUd>.

- [225] African Union Commission, «Agenda 2063. The África we want», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38JeDki>.
- [226] S.-P. Jun, «A comparative study of hype cycles among actors within the socio-technical system: With a focus on the case study of hybrid cars», *Technological Forecasting and Social Change*, Volumen 79, 8, Oct 2012, P. 1413-1430, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2012.04.019>.
- [227] R. N. Foster, *Innovation: The Attacker's Advantage*, Summit Books, 2016.
- [228] B. S. Van Gosen, P. L. Verplanck, R. R. Seal II, K. R. Long y J. Gambogi, «Rare-earth elements, chap. O of Critical mineral resources of the United States—Economic and enviromental geology and prospects for future supply», U.S. Geological Survey, 2017. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3133/pp1802O>.
- [229] T. Goonan, «Rare earth elements—End use and recyclability», U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2011. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/320b3AO>.
- [230] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2017», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eexp53>. [Último acceso: Oct 2018].
- [231] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2017», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BYtNpI>. [Último acceso: Octubre 2018].
- [232] International Energy Agency, «Change in total primary energy demand in the New Policies Scenario, 2017-2040», 27 Nov 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38HG6CL>.
- [233] Comisión Europea, «Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Executive summary», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfcZUw>. [Último acceso: 14 Oct 2018].
- [234] Royal Society of Chemistry, «Periodic Table - Hafnium», [En línea]. Available: <https://rsc.li/2BOebp0>. [Último acceso: Oct 2018].
- [235] U.S. Department of Energy, «Critical Materials Strategy 2011,» 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gHNp7>.
- [236] J. G. Speight, «Handbook of Offshore Oil and Gas Operations», Elsevier, 2015. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-85617-558-6.00001-5>.
- [237] B. P. Tissot y D. H. Welte, *Petroleum Formation and Occurrence. Second Revised and Enlarged Edition*, Springer-Verlag, 1984.
- [238] F. Melendez Hevia, *El origen del petróleo*, Universidad Complutense, 1982.
- [239] The Norwegian Petroleum Directorate, «How is petroleum formed?», 15 Mar 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321jGex>. , <https://www.norskipetroleum.no/en/petroleum-resources/petroleum-formation/> [Último acceso: 01 Nov 2018].
- [240] Ente Vasco de la Energía, «La energía. Extracción de hidrocarburos», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Zh3kNg>. [Último acceso: Nov 2018].
- [241] N. J. Hyne, *Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Production Third Edition*, Tulsa - Oklahoma: PenWell, 2012.
- [242] National Academy of Sciences, «Oil in the Sea: Inputs, Fates and Effects», National Academy Press, 1985. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2APzndK>.

- [243] J. G. Speight, *Handbook of Petroleum Product Analysis*, Hoboken - New Jersey: Wiley-Interscience - John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [244] Y. Han, Y. Zhang, C. Xu y C. S. Hsu, «Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum», *Fuel*, Volumen 221, 1 Jun 2018, P. 144-158 , [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.110>.
- [245] U.S. Energy Information Administration, «Glossary», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZSNyXT>. [Último acceso: 02 Nov 2018].
- [246] M. K. Hubbert, *Nuclear energy and the fossil fuels*, S. D. Company, Ed., Houston, Texas: Drilling and Production Practice (1956) - American Petroleum Institute, 1956.
- [247] Organization of the Petroleum Exporting Countries, «2018 OPEC World Oil Outlook», Sep 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iJEtJw>.
- [248] CNBC, «Quest for new oil discoveries still on back burner», 4 Ene 2018. [En línea]. Available: <https://cnb.cx/3iJEptg>. [Último acceso: 4 Nov 2018].
- [249] ACIEP - Asociación Española de Compañías de Investigación, Exploración y Producción de hidrocarburos y almacenamiento subterráneo, «Exploración y Producción de Hidrocarburos. Panorama de la industria offshore en España», 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38LFaxw>.
- [250] El País, «Repsol cierra su aventura canaria sin hallar suficiente petróleo y gas», 16 Ene 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DmzEFH>.
- [251] Ministerio para la Transición Ecológica, «Mapa de posición de permisos de investigación y concesiones de explotación y almacenamiento subterráneo», [En línea]. Available: <https://bit.ly/31YDUFP>. [Último acceso: 11 Nov 2018].
- [252] La Voz de Galicia, «Baiona busca petróleo y Moaña pone la primera piedra de Rande», *La Voz de Galicia*, 6 Mar 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BUwqJi>. [Último acceso: 18 Nov 2017].
- [253] La Opinión de A Coruña, «¿Oro negro bajo el mar gallego?», *La Opinión de A Coruña*, 22 Jun 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Cq2sfZ>. [Último acceso: 18 Nov 2018].
- [254] El País, «Buenas perspectivas en los sondeos petrolíferos de Eniensa en Galicia», 10 Sep 1984. [En línea]. Available: <https://bit.ly/322gWOb>. [Último acceso: 18 Nov 2018].
- [255] Atlántico Diario, «El petróleo jamás encontrado», 22 04 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38GMdHC>. [Último acceso: 18 11 2018].
- [256] La Voz de Galicia, «Comenzó el montaje de la primera prospección petrolífera en Galicia», 3 Sep 1984. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OcCory>.
- [257] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, «Licencias de prospección petrolera (permisos y licencias investigación hidrocarburos) Archivo técnico de hidrocarburos (ATH)», [En línea]. Available: <https://bit.ly/323s1hF>. [Último acceso: Dic 2018].
- [258] La Región, «El petróleo jamás encontrado», 22 04 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gJGKCO>. [Último acceso: 18 11 2018].
- [259] A. Metzler, M. Rivas, I. Sealy y R. Snyder, «Las especies silvestres marinas y las actividades de E&P: Trabajando para coexistir», *Oilfield Review* 27, no. 1 (Schlumberger), May 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fdPUqQ>.
- [260] CGG, «Media Gallery», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BLKGEj>.

- [261] UK Department of Trade and Industry, «An overview of offshore oil and gas exploration and production activities», 2001. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AKlgq1>.
- [262] Schlumberger, «Introducción al Equipo de Perforación», Schlumberger, Abr 2004. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ObTFkx>.
- [263] Schlumberger, «Drill String Design & BHA Design», 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BLEEUc>. [Último acceso: 16 Nov 2018].
- [264] P. Cheung, A. Hayman, R. Laronga, G. Cook, P. Goetz, M. Marshall, S. Hansen, M. Lamb, B. Li, M. Larsen, M. Orgren y J. Redden, «Imágenes claras en los lodos base aceite», Schlumberger Oilfield Review, 2002. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iNaVe5>.
- [265] Wild Well Control, «Equipamiento de control de presión», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gKK3JW>. [Último acceso: Dic 2018].
- [266] Canadian Association of Petroleum Producers, «Exploration Drilling in Atlantic Canada Offshore Fact Sheet», Oct 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CiPukg>.
- [267] API - American Petroleum Institute, «API Recommended Practice 2A-WSD. Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms», Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iJGy8i>.
- [268] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 19902:2007 Petroleum and natural gas industries -- Fixed steel offshore structures», Dic 2007. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfIfmo>.
- [269] API - American Petroleum Institute, «API RP 2FPS Planning, Designing, and Constructing Floating Production Systems», 1 Octubre 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AOvmWW>.
- [270] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 19904-1:2006 Petroleum and natural gas industries -- Floating offshore structures -- Part 1: Monohulls semi-submersibles and spars», Nov 2006. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgP7p4>.
- [271] World Ocean Review, «Marine Resources - Opportunities and Risks», maribus gGmbH, 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oa7a4r>.
- [272] M. Varhaug, «Subsee Infrastructure», Oilfield Review, 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fiuV67>.
- [273] PetroWiki, «Production risers», SPE International, 22 Mar 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2APCGSc>. [Último acceso: 4 Dic 2018].
- [274] Mactech Offshore, «What is offshore decommissioning [Infographic]», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CkBUNq>. [Último acceso: 5 Dic 2018].
- [275] The Australian Petroleum Production & Exploration Association, «Seismic surveying», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W3veu9>.
- [276] J. Gordon, D. Gillespie, J. R. Potter, A. Frantzis, M. P. Simmonds, R. Swift y D. Thompson, «A Review of The Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals», Marine Technology Society Journal 37(4):16-34, Dic 2003. [En línea]. Available: <https://cutt.ly/HpyEhU3>.
- [277] U. K. Verfuss, D. Gillespie, J. Gordon, T. A. Marques, B. Miller, R. Plunkett, J. A. Theriault, D. J. Tollit, D. P. Zitterbart, P. Hubert y L. Thomas, «Comparing methods suitable for monitoring marine mammals in low visibility conditions during seismic

- surveys», *Marine Pollution Bulletin*, Volumen 126, Ene 2018, P. 1-18, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.034>.
- [278] Statista, «Producción mundial de petróleo de 1998 a 2018,» [En línea]. Available: <https://bit.ly/38FhhHR>. [Último acceso: 10 Abr 2020].
- [279] ITOPF - International Tanker Owners Pollution Federation Limited, «Oil Tanker Spill Statistics 2019», Ene 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gIfggH>.
- [280] A. C. Bejerano y J. Michel, «Large-scale risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in shoreline sediments from Saudi Arabia: Environmental legacy after twelve years of the Gulf war oil spill», *Environmental Pollution*, Volumen 158, 5, May 2010, P. 1561-1569, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.019>.
- [281] Repsol, «Informe anual Repsol 2018. Información corporativa Repsol. Tabla de conversiones», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CiRFUY>. [Último acceso: Abr 2020].
- [282] N. Earthea, E. King, B. Wright y R. C. Bullard, «Ambient air concentrations exceeded health-based standards for fine particulate matter and benzene during the Deepwater Horizon oil spill, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66:2, 224-236», *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66:2, 224-236, 2016. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1114044>.
- [283] A. Bruederle y R. Hodler, «Effect of oil spills on infant mortality in Nigeria», *PNAS* Mar 19, 2019 116 (12) 5467-5471, 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.1818303116>.
- [284] Agencia Espacial Europea (ESA), «Natural Disasters. Oil Slicks. Galicia (Spain), November 2002 - April 2003», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323IIKe>.
- [285] H. Poot, B. J. Ens, H. de Vries, M. A. H. Donners, M. R. Wernand y J. M. Marquenie, «Green Light for Nocturnally Migrating Birds», *Ecology and Society* 13(2): 47, 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gBtNuG>.
- [286] R. A. Ronconi, K. A. Allard y P. D. Taylor, «Bird interactions with offshore oil and gas platforms: Review of impacts and monitoring techniques», *Journal of Environmental Management*. Volumen 147, 1 Ene 2015, P.34-45, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.031>.
- [287] M. Olivares Cruz, M. A. Cabrera Ramírez, L. Rosales Hoz y A. Carranza Edwards, «La Frontera Final: El Océano Profundo», SEMARNAT-INE, Low Pfeng, Antonio; Peters, Edward, Nov 2006. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38H9jxP>.
- [288] International Seabed Authority, «Publicaciones-Folletos: Nódulos Polimetálicos», [En línea]. Available: <https://bit.ly/38GQECg>. [Último acceso: 2018].
- [289] International Seabed Authority, «Deep Seabed Mineral Contractors», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OezLFq>. [Último acceso: Oct 2018].
- [290] International Seabed Authority, «Publicaciones-Folletos: Sulfuros Polimetálicos», [En línea]. Available: <https://bit.ly/31YIUu5>. [Último acceso: Oct 2018].
- [291] International Seabed Authority, «Publicaciones-Folletos: Cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Od96Jq>. [Último acceso: Oct 2018].

- [292] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover, «Investigation of marine mineral resources», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fg7k5T>. [Último acceso: Oct 2018].
- [293] International Energy Agency (IEA), «Offshore Wind Outlook 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gBuBQe>.
- [294] U.S. Department of the Interior. Bureau of Ocean Energy Management, «Renewable Energy on the Outer Continental Shelf», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZflaAb>. [Último acceso: Dic 2019].
- [295] WindEurope, «Wind energy in Europe in 2019. Trends and statistics», 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fggpff>.
- [296] Iberdrola, «¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar?», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZT56mO>. [Último acceso: Dic 2019].
- [297] International Renewable Energy Agency (IRENA)., «Innovation outlook. Offshore Wind», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfjB5i>.
- [298] Ørsted, «Our experience with suction buckets jacket», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fe9lzC>. [Último acceso: Dic 2019].
- [299] La Vanguardia, «¿Por qué no hay molinos para aprovechar la energía eólica en las costas de España?», 07 Jul 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ecjsnf>.
- [300] J. Virgilio Marquez, «Evolución y perspectivas de la eólica offshore en España», Club Español de la Energía. Cuaderno de Energía Nº 56, Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iXl0VY>.
- [301] Navantia, «La UTE Navantia-Windar se adjudica la construcción de 5 unidades flotantes de eólica marina», 23 Feb 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3e92XII>. [Último acceso: 8 Dic 2019].
- [302] Equinor, «Equinor - the world's leading floating offshore wind developer», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Dk6iI2>.
- [303] Repsol, «Windfloat Atlantic, el primer parte eólico flotante semisumergible en el mundo», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38Fk0RB>. [Último acceso: Dic 2019].
- [304] Scottish Government, «Floating Offshore Wind: Market and Technology Review», Jun 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BUTvvs>.
- [305] International Renewable Energy Agency, «Floating foundations: A game changer for offshore wind power», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OcI9pa>.
- [306] Global Wind Atlas, «Global Wind Atlas 3.0, a free, web-based application developed, owned and operated by the Technical University of Denmark (DTU). The Global Wind Atlas 3.0 is released in partnership with the World Bank Group, utilizing data provided by Vortex», [En línea]. Available: <https://globalwindatlas.info>. [Último acceso: Dic 2019].
- [307] EMODnet - The European Marine Observation and Data Network. European Union., «EMODnet Bathymetry. Understanding the topography of the European seas. Bathymetry Viewing and Download service», European Union, [En línea]. Available: <https://portal.emodnet-bathymetry.eu>. [Último acceso: 27 Jun 2020].

- [308] Ministerios de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino e Industria, Turismo y Comercio, «Estudio estratégico ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos», Abr 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DrRs2q>.
- [309] International Renewable Energy Agency IRENA, «Future of wind. Depolyment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects», Oct 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fh8fD8>.
- [310] International Renewable Energy Agency (IRENA)., «Offshore innovation widens renewable energy options», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3feZtWx>.
- [311] U.S. Geological Service, «The U.S. Geological Survey Gas Hydrates Project», 2020. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/3eacteA>.
- [312] K. Kretschmer, A. Biastoch, L. Rüpke y E. Burwicz, «Modeling the fate of methane hydrates under global warming», *Global Biogeochemical Cycles*, Volumen 29, 5, May 2015, P. 610-625, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1002/2014GB005011>.
- [313] European Cooperation in Science and Technology (COST), «ES1405 - Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe (MIGRATE)», Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action ES1405: Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe (MIGRATE), 14 Nov 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZWfSxk>.
- [314] Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. Agency for Natural Resources and Energy, «Second Offshore Methane Hydrate Production Test Begins», 10 Abr 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZcwbsM>. [Último acceso: 28 Nov 2018].
- [315] CSIC, «ERGAP. Determinación y Valoración de los Riesgos Geoambientales en el Área de hundimiento del Prestige», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fh2Ps3>. [Último acceso: 29 Nov 2018].
- [316] La Voz de Galicia, «Encuentran frente a Galicia el mayor cráter de origen gasista del mundo», 21 Dic 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iNh5Lf>. [Último acceso: 28 Nov 2018].
- [317] Universidade de Vigo, «Investigadores vigueses buscarán, a bordo do Hespérides, datos sobre a evolución climática e tectono-sedimentaria da costa galega», 21 Ago 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W39G0B>. [Último acceso: 28 Nov 2018].
- [318] D. Rey García, «Exploración del Gran Burato: Indicios de Gas y Cambios Climáticos», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgyMR5>.
- [319] Xunta de Galicia, «Economía e Industria financia a investigación do Gran Burato para confirmar a existencia de gas no subsolo mariño galego», 01 Ago 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323MLpU>. [Último acceso: 28 Nov 2018].
- [320] K. A. Miller, K. F. Thompson, P. Johnston y D. Santillo, «An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps», *Frontiers in Marine Science*, Volumen 4 (2018), Art. 418, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00418>.
- [321] C. L. Van Dover, «Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: A review», *Marine Environmental Research*, Volumen 102, Dec 2014, P. 59-72, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.008>.
- [322] R. E. Boschen, A. A. Rowden, M. R. Clark, A. Pallentin y J. P. Gardner, «Seafloor massive sulfide deposits support unique megafaunal assemblages: Implications for

- seabed mining and conservation», Marine Environmental Research; Volumen 115, Abr 2016, P. 78-88, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.02.005>.
- [323] C. W. Armstrong, N. S. Foley, R. Tinch y S. van den Hove, «Services from the deep: Steps towards valuation of deep sea goods and services», Ecosystem Services, Dic 2012, P. 2-13, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.001>.
- [324] Ministerio de Defensa, «Manual de Derecho del Mar», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iJNBOi>. [Último acceso: Oct 2018].
- [325] United Nations. Oceans and Law of the Sea, «Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar», 1982. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W2mcxt>. [Último acceso: Oct 2018].
- [326] W. Cadena y C. Devia, «Colombia y la territorialización de sus mares. Conflictos limítrofes y la Convención de Derecho del Mar», Revista Prolegómenos. Derechos y Valores, 15, 30, 199-223, 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iHrb0d>.
- [327] Corte Internacional de Justicia, «Informes anuales», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AKtFK5>.
- [328] Tribunal Permanente de Arbitraje de La Haya, «Casos», Varios años. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oc0pPm>.
- [329] Tribunal Internacional del Derecho del Mar, «Casos», Varios años. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gGOBRs>.
- [330] BBC News, «Conflicto entre Rusia y Ucrania: por qué el mar de Azov es el último foco de tensión entre ambos países», 26 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bbc.in/2DvnzOR>.
- [331] RTVE, «La tensión entre Rusia y Ucrania aumenta en el estrecho de Kerch al reterner Moscú a tres barcos ucranianos», 26 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Oo4rVb>. [Último acceso: 06 Dic 2018].
- [332] Royal Society of Chemistry, «Periodic Table», Oct 2018. [En línea]. Available: <http://www.rsc.org/periodic-table>.
- [333] US Geological Survey, «Minerals information. Barite Statistics and Information», 2018. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/2ZYnwmd>. [Último acceso: Oct 2018].
- [334] . M. A. Angulo, C. J. Crawford y . L. D. Miller, «2008 Minerals Yearbook BORON», 2008. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/322qetu>.
- [335] P. Posadas, A. González-Jiménez y J. Valentín, «Natural rubber: Properties, behavior and uses», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZNgGzy>.
- [336] M. Miller, «Fluorespar», US Geological Survey, 2004. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/2ZdpAY3>.
- [337] US Geological Survey, «Minerals Information. Phosphate Rock Statistics and Information», 2018. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/2O7t1t4>. [Último acceso: Oct 2018].
- [338] US Geological Survey, «2015 Minerals Yearbook. GRAPHITE [ADVANCE RELEASE]», 2015. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/2Cox3T>. [Último acceso: Oct 2018].
- [339] L. Bruhwiler, A. M. Michalak, R. Birdsey, J. B. Fisher, R. A. Houghton, D. N. Huntzinger y J. B. Miller, «Chapter 1: Overview of the global carbon cycle. In Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report

- [Cavallaro, N., G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao, and Z. Zhu (eds.)], U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 42-70., 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch1>.
- [340] NASA Global Climate Change. Vital Signs of the Planet, «Carbon Dioxide», [En línea]. Available: <https://go.nasa.gov/3ehJtSd>. [Último acceso: 2 Feb 2019].
- [341] P. M. Bello Bugallo, *Tecnologías de captura y usos de gases de efecto invernadero*, Notas de clase. Curso 2018-19. Máster Universitario en Energías Renovables, Cambio Climático y Desarrollo Sostenible, Universidade de Santiago de Compostela.
- [342] Comisión Europea, «C(2015) 6317 final. Towards an Integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: Accelerating the European Energy System Transformation» 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38GVK1m>.
- [343] Comisión Europea. Strategic Energy Technologies Information System (SETIS), «SET-Plan Declaration of Intent on strategic targets in the context of Action 9 'Renewing efforts to demonstrate carbon capture and storage (CCS) in the EU and developing sustainable solutions for carbon capture and use (CCU)'», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BWtcov>. [Último acceso: 06 Abr 2019].
- [344] J. Bujnicki, P. Dykstra, E. Fortunato, R.-D. Heuer, C. Keskitalo y P. Nurse, «Novel carbon capture and utilisation technologies», European Commission. Scientific Advice Mechanism (SAM), 23 May 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gINeSb>.
- [345] Comisión Europea, «Acción por el clima», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eeFhmm>. [Último acceso: 06 Abr 2019].
- [346] Diario Oficial de la Unión Europea, «Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero», 23 Abr 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323CIAP>.
- [347] Diario Oficial de la Unión Europea, «Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE», 23 Abr 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321IK4Z>.
- [348] Diario Oficial de la Unión Europea, «Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono», 23 Abr 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZU5tgP>.
- [349] Diario Oficial de la Unión Europea, «Decisión nº 406/2009/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el esfuerzo de los Estados miembros para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a fin de cumplir los compromisos adquiridos por la Comunidad hasta 2020», 23 Abr 2009. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Cn3Jo2>.
- [350] Comisión Europea, «Un marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030. COM(2014) 15 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones», 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fdZA4E>.
- [351] Comisión Europea, «Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050. COM(2011) 112 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al

- Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones», 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321dl2I>.
- [352] M. Wang, A. S. Joel, C. Ramshaw, D. Eimer y N. M. Musa, «Process intensification for post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A critical review», *Applied Energy*, 158 (2015) P. 275–291, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.083>.
- [353] Comisión Europea, «EU initiatives explained», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OaLODN>.
- [354] Comisión Europea, «Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. COM(2015) 614 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones», 2015. [En línea]. Available: <https://cutt.ly/Lpuerav>.
- [355] Ministerio para la Transición Ecológica, «Anteproyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gP9oCB>.
- [356] Ministerio para la Transición Ecológica, «Borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030», Feb 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iOONQA>.
- [357] Global CCS Institute, «CCS Image Library», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AOEcE6>. [Último acceso: 14 Dic 2019].
- [358] E. Oko, M. Wang y A. S. Joel, «Current status and future development of solvent-based carbon capture», *International Journal of Coal Science & Technology*, 4, 5-14 (2017), [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40789-017-0159-0>.
- [359] Y. Wang, L. Zhao, A. Otto, M. Robinius y D. Stolten, «A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants», *Energy Procedia* 114 (2017) P. 650–665, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>.
- [360] H. Ahn, M. Luberti, Z. Liu y S. Brandani, «Process configuration studies of the amine capture process for coal-fired power plants», *International Journal of Greenhouse Gas Control* 16 (2013) P. 29–40, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.03.002>.
- [361] Plataforma Tecnológica Española del CO₂, «Captura de CO₂: tecnologías para una captación a gran escala», 2014. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3em7yaI>.
- [362] C. Bartolome Muñoz, P. Mora Peris y J. D. Recalde Rodríguez, «Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento», *Agrupación de fabricantes de cemento de España*, 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3frvU3O>.
- [363] R. M. Cuéllar-Franca y A. Azapagic, «Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts», *Journal of CO₂ Utilization* 9 (2015) P. 82–102, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>.
- [364] D. Y. Leung, G. Caramanna y M. Maroto-Valer, «An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 39, Nov 2014, P. 426-443, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>.

- [365] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos y L. Meyer, «Carbon Dioxide Capture and Storage», IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ecYHaX>.
- [366] H. de Coninck, A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg y T. Sugiyama, «Strengthening and Implementing the Global Response. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [MassonDelmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press», IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2Cnjziw>.
- [367] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo y K. Heidel, «A process for capturing CO₂ from the atmosphere», Joule, Volumen 2, 8, Ago 2018, P. 1573-1594, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>.
- [368] M. Fasihi, O. Efimova y C. Breyer, «Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants», Journal of Cleaner Production 224 (2019) P. 957-980, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- [369] C. Beuttler, L. Charles y J. Wurzbacher, «The role of Direct Air Capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions», Frontiers in Climate, Volumen 1 (2019), Art. 10, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>.
- [370] C. Consoli, «Bioenergy and Carbon Capture and Storage. 2019 Perspective», Global CSS Institute, 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/31XhuEW>.
- [371] E. Alper y Y. O. Ozge, «CO₂ utilization: Developments in conversion processes», Petroleum 3 (2017) P. 109-126, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petlm.2016.11.003>.
- [372] U.S. Department of Energy, Ministry of Energy, Industry and Mineral Resources, Kingdom of Saudi Arabia, «Accelerating breakthrough innovation in Carbon Capture, Utilization and Storage. Report of the Mission Innovation Carbon Capture, Utilization, and Storage Experts' Workshop», Sep 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3217jz3>.
- [373] Carbon4PUR, «Carbon4PUR», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRLf7m>. [Último acceso: 1 Feb 2019].
- [374] Repsol, «Convertir CO₂», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fiZmZO>. [Último acceso: 01 Ene 2019].
- [375] Covestro, «A brighter use of CO₂», 7 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3egU0x4>. [Último acceso: 01 Feb 2019].
- [376] Repsol, «Polioles», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gMpDjQ>. [Último acceso: 01 Feb 2019].
- [377] Covestro, «A brighter use of CO₂», 7 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3egU0x4>. [Último acceso: 01 Feb 2019].

- [378] L. Cristobal Andrade, «Development and Application of Methodologies to get Sustainable Industrial Systems, Tesis Doctoral», 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3emTgXn>.
- [379] P. M. Bello Bugallo, A. Stupak, L. Cristobal Andrade y R. Torres Lopez, «Material Flow Analysis in a cooked mussel processing industry», *Journal of Food Engineering* 113 (2012) 100-117, 2012. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.014>.
- [380] P. Bello Bugallo, L. Cristobal Andrade, Magan Iglesias, A. y R. Torres Lopez, «Integrated environmental permit through Best Available Techniques: evaluation of the fish and seafood canning industry», *Journal of Cleaner Production* 47 (2013) 253-264, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.022>.
- [381] A. Garcia Rellan, C. Vazquez Brea y P. Bello Bugallo, «Towards sustainable mobile systems configurations: Application to a tuna purse seiner», *Science of the Total Environment* 631–632 (2018) 1623–1637, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.133>.
- [382] M. Torres Rodriguez, L. Cristobal Andrade, P. Bello Bugallo y J. Casares Long, «Combining LCT tools for the optimization of an industrial process: Material and energy flow analysis and best available techniques», *Journal of Hazardous Materials* 192 (2011) P. 1705–1719, [En línea]. Available: dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.003.
- [383] G. Zapelloni, A. Garcia Rellan y P. M. Bello Bugallo, «Sustainable production of marine equipment in a circular economy: deepening in material and energy flows, best available techniques and toxicological impacts», *Science of the Total Environment* 687 (2019) 991–1010, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.058>.
- [384] L. Cristobal Andrade, M. A. Bernal Pampin, M. Taboada Gomez y P. M. Bello Bugallo, «Optimization of Improvable Flows by combining BAT Analysis and process simulation», *Chemical Engineering Research and Design* 92 (2014) P. 1796-1987, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.025>.
- [385] A. Zimmermann, J. Wunderlich, G. Buchner, L. Müller, K. Armstrong, S. Michailos, A. Marxen, H. Naims, F. Mason, G. Stokes y E. Williams, «Techno-Economic Assessment & Life-Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization», CO₂Chem Media and Publishing Ltd, 2018. [En línea]. Available: <https://www.doi.org/10.3998/2027.42/145436>.
- [386] OECD SIDS, «UREA», IPCS INCHEM, 13 Dic 2005. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fhfF9s>. [Último acceso: 25 Feb 2019].
- [387] Ministerio para la Transición Ecológica, «Emisiones de CO₂ debidas a la fertilización con urea», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OaBBr1>. [Último acceso: 2018 Feb 27].
- [388] U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, «Enhanced Oil Recovery», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3emadRK>. [Último acceso: 02 Feb 2019].
- [389] U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, «Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery. Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution», 2010. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OdczYc>.

- [390] M. K. Verma, «Fundamentals of Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery (CO₂-EOR) - A Supporting Document of the Assessment Methodology for Hydrocarbon Recovery Using CO₂-EOR Associated with Carbon Sequestration», U.S. Geological Survey, 2015. [En línea]. Available: <https://on.doi.gov/2AL67Vj>.
- [391] M. S. Anne Perera, R. Pathegama Gamage, T. Dilanka Rathnaweera, A. Savinda Ranathunga, A. Koay y X. Choi, «A Review of CO₂-Enhanced Oil Recovery with a Simulated Sensitivity Analysis, *Energies* 2016, 9(7), 481», *Energies* 2016, 9(7), 481, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/en9070481>.
- [392] W. Heidug, «Joint IEA-OPEC workshop on CO₂-enhanced oil recovery with CCS», International Energy Agency, 2012. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iL0MhX>.
- [393] International Energy Agency, «Storing CO₂ through Enhanced Oil Recovery», 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/321hQdC>.
- [394] C. McGlade, G. Sondak y M. Han, «Commentary: Whatever happened to enhanced oil recovery?», International Energy Agency, 28 Nov 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iQbvaK>. [Último acceso: 03 Mar 2019].
- [395] S. Barker y A. Ridgwell, «Ocean Acidification», *Nature. The Nature Education Knowledge Project*, 2012. [En línea]. Available: <https://go.nature.com/2BWY1hB>. [Último acceso: 04 Marzo 2019].
- [396] K. J. Kroeker, R. Kordas, R. N. Crim y I. Hendriks, «Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming», *Global Change Biology*, Volumen 19, 6, Jun 2013, P. 1884-1896, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>.
- [397] International Energy Agency, «CO₂ Emissions from fuel combustion. Highlights», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gKpRYx>.
- [398] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), «"E-Fuels" Study. The potencial of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU», Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) and Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRMUtO>.
- [399] C. Gürtler y A. Stute, «CO₂ as a feedstock for polymers», *SETIS Magazine* n° 11. Carbon Capture Utilisation and Storage. Pág. 24-26, European Commission. Strategic Energy Technologies Information System, Ene 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3iHym8F>.
- [400] P. Styring, D. Jansen, H. de Coninck, H. Reith y K. Armstrong, «Carbon Capture and Utilisation in the green economy. Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials», The Centre for Low Carbon Futures 2011 and CO₂Chem Publishing 2012, Jul 2011. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2O8YMIp>.
- [401] Carbon Recycling International / Carbon4Pur, «The Emissions-to-Liquids technology and CRI's capabilities in Power-to-X», 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZRUhkV>.
- [402] U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, «Syngas conversion to methanol», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DINpo8>. [Último acceso: 9 Abr 2019].
- [403] A. Awgustow, T. Kuchling y H. Wollmerstädt, «Production of GHG-reduced liquid fuels», Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CkP7G0>.

- [404] M. Lambert, «Power-to-Gas: Linking Electricity and Gas in a Decarbonising World?», University of Oxford. The Oxford Institute for Energy Studies, Oct 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AOHK9o>.
- [405] «REFHYNE project. Project Overview», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2O7ysrY>. [Último acceso: 11 Mar 2019].
- [406] Umwelt Bundesamt (German Environment Agency), «Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2VYz7Ar>.
- [407] M. Hillestad, «Modeling the Fischer–Tropsch Product Distribution and Model Implementation», Chemical Product and Process Modeling, Volumen 10:3 (2015), P. 147–159, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1515/cppm-2014-0031>.
- [408] J. Dodaro, «Fischer-Tropsch Process», Submitted as coursework for PH240, Stanford University, Fall 2015, 11 Dic 2015. [En línea]. Available: <https://stanford.io/3ffnoFl>. [Último acceso: 13 Mar 2019].
- [409] C. Matranga y D. Shekhawat, «New Advances for Fischer-Tropsch Catalysis», U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, Ago 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38IuBuU>.
- [410] Methanol Institute, «Methanol price and supply/demand», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2AL7uDr>. [Último acceso: 21 Mar 2020].
- [411] ENEA Consulting, «The potential of Power-To-Gas», 2016. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38F8xl0>.
- [412] Plastics Europe. Association of Plastics Manufacturers, «Plastics - the Facts 2017», 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38HkBSJ>.
- [413] G. Funk, D. Myers y B. Vora, «A different game plan», UOP Honeywell, Hydrocarbon Engineering Magazine, 2013. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W5MC1b>.
- [414] Chemical Safety Facts.org, «Óxido de etileno», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fbcAb4>. [Último acceso: 15 Abr 2019].
- [415] American Chemistry Council, «Ethylene Oxide - An Essential Raw Material for Many Important Products», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3eeCnxT>. [Último acceso: 15 Abr 2019].
- [416] Repsol, «Óxido de Propieno. El reactivo universal», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZfJ11b>. [Último acceso: 06 Abr 2019].
- [417] Repsol, «Propileno glicol para uso industrial», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZWQQcy>. [Último acceso: 06 Abr 2019].
- [418] P. Tian, Y. Wei, M. Ye y Z. Liu, «Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization», ACS Catal. 2015, 5, (2015) 1922–1938, [En línea]. Available: <https://cutt.ly/XpuPXIa>.
- [419] A. Alshammari, A. A. Bagabas, V. Narayana Kalevaru y A. Martin, «Production of Ethylene and its Commercial Importance in the Global Market», Petrochemical Catalyst Materials, Processes, and Emerging Technologies (2016) P. 82-115, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9975-5.ch004>.
- [420] Sandbag, «The CO₂ Economy – Mineral Carbonation Technology Overview», Oct 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323iuHu>.

- [421] A. A. Olajire, «A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂», Journal of Petroleum Science and Engineering, Volumen 109, Sep 2013, P. 364-392, [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>.
- [422] CarbonCure, «Frequently Asked Questions for engineers», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2OcSzoM>.
- [423] S. Monkman, «TECHNICAL NOTE - Types of Concrete Carbonation», Carboncure, [En línea]. Available: <https://bit.ly/2CkQRPY>.
- [424] M. Fernández Bertos, S. Simons, C. Hills y P. Carey, «A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂», Journal of Hazardous Materials, Volumen 112, 3, 30 Ago 2004, P. 193-205, [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.04.019>.
- [425] S. Monkman, «TECHNICAL NOTE: Impact of CO₂ Utilization on Concrete Pore Solution pH», CarbonCure, Sean Monkman PhD, PEng, SVP Technology Development, [En línea]. Available: <https://bit.ly/2BY4XGx>.
- [426] W. J. J. Huijgen, «Carbon Dioxide Sequestration by Mineral Carbonation, Tesis Doctoral», Energy research Centre of the Netherlands, The Netherlands, 2007. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DvyJmJ>.
- [427] V. Meyer, N. DeCristofaro, N. Bryant y S. Sahu, «Solidia Cement an example of Carbon Capture and Utilization», 6th International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete, June 19–22, 2017 Brno, Czech Republic, ISBN, 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2W6BKAh>.
- [428] Carbon8, «Using carbon dioxide to give waste value», [En línea]. Available: <https://bit.ly/2DlRbhi>. [Último acceso: 24 Mar 2019].
- [429] Greenpeace, «Por qué la Captura y Almacenamiento de Carbono no salvará el clima», 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/38IwLL2>.
- [430] Ecologistas en Acción, «El último aliento de la industria del carbón», 2008. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2ZVhW3N>.
- [431] Global CCS Institute, «Global Status of CCS 2019», 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/323LPS3>.
- [432] Centro Nacional de Protección de Infraestructuras y Ciberseguridad, «CNPIC - Inicio», [En línea]. Available: <https://bit.ly/3fgMzHg>. [Último acceso: Nov 2019].

DIFUSIÓN DE RESULTADOS

XXV Encontro galego-portugués de química

Cidade da Cultura. 20-22 de novembro de 2019

Póster

Francisco López, A., Lema Martínez, A., Bello Bugallo, P.M. Sustainable strategies and tools for wildfires prevention and control: A dynamic evaluation.

Congreso Internacional. Espacios globales y seguridad: Estrategias de respuesta española

Universidade de Santiago de Compostela. Centro de Estudios de Seguridade (CESEG) y Grupo de Estudios Internacionales USC (GRESIN)

Facultad de Derecho. Santiago de Compostela. 10, 18, 19 de octubre de 2018

Ponencia

Lema Martínez, A., Bello Bugallo, P.M. Demanda de materias primas y recursos energéticos. Riesgos para la seguridad medioambiental y conflictos de delimitación.

Universidade de Santiago de Compostela. Universidade de verán

Curso: Onde atopar traballo nas enxeñarías

Facultad de Ciencias. Lugo. Julio 2017

Ponencia

Lema Martínez, A. La energía eléctrica como base de la industrialización y su dependencia de la ingeniería.

Universidade de Santiago de Compostela. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Aula profesional

Actividad: Aprovechamiento de recursos materiales y energéticos para el desarrollo sostenible. Julio 2017

Ponencia

Lema Martínez, A. La distribución de energía eléctrica.

Universidade de Santiago de Compostela. Centro de Estudios de Seguridad (CESEG)

Jornada Centro de Estudios de Seguridad y Ministerio de Defensa.

Tormenta de Ideas para la nueva Estrategia de Seguridad Nacional

19 de junio de 2017

Seguridad energética y seguridad natural.

No se encontraron entradas de tabla de contenido.